

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robototechniky

Aplikace strojového vidění pro robotizovaná technologická
pracoviště

Machine Vision Application for Robotized Cells

Student:	Bc. Tomáš Chamrad
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Václav Krys, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robototechniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Chamrad

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2301T013 Robotika

Téma:

**Aplikace strojového vidění pro robotizovaná technologická pracoviště
Machine Vision Application for Robotized Cells**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši komerčně dostupných systémů strojového vidění.
2. Popište aktuálně dostupné systémy strojového vidění na katedře robototechniky.
3. Navrhněte a realizujte demonstrační úlohy s využitím strojového vidění na pracovištích ABB IRB 140 a IRB 360. Popište výhody a nevýhody obou řešení systémů strojového vidění.
4. Práci doplňte podrobnou dokumentací k realizovaným úlohám.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD).

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2007. 48 s.

ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

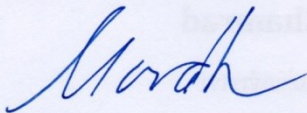
Manuály ABB dodané s robotizovaným pracovištěm.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

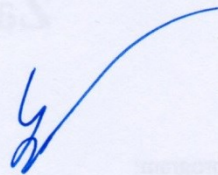
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Krys, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Chamrad

Adresa trvalého pobytu autora práce: Petřvaldská 1571, Šenov, 739 34
Česká Republika

Poděkování

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Příležitost pro mladé výzkumníky, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0016, podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především Ing. Václavu Krysovi, Ph.D., Bc. Jakubu Mžíkovi a Bc. Martinu Soukupovi za poskytnuté konzultace a pomoc při přípravě mé diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CHAMRAD, T. *Aplikace strojového vidění pro robotizovaná technologická pracoviště: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2013, 122 s. Vedoucí práce: Krys, V.

Diplomová práce se zabývá možnostmi aplikace systémů strojového vidění do robotizovaných pracovišť. V úvodu je popsán současný stav techniky na poli jednotlivých prvků systému a současná zařízení umístěná na Centru robotiky Katedry robototechniky. V hlavní textové části jsou popsány dvě demonstrační úlohy využívající rozdílné systémy strojového vidění. U každé úlohy byl řešen systém osvětlení, návrh a realizace potřebných periférií a tvorba řídicího programu. Obě úlohy byly podrobeny zkušebnímu provozu a případné problémy a nedostatky byly shrnuty v závěru práce obsahujícím také doporučení, jak zjištěné nedostatky zmírnit nebo zcela eliminovat.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CHAMRAD, T. *Machine Vision Application for Robotized Cells: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2013, 122 p. Thesis head: Krys, V.

Master thesis deals with possibilities of machine vision systems integration into robotized cells. The introduction contains description of the state of the art in the field of machine vision products and current systems installed in the Robotics Centre of the Department of Robotics. The main text part contains two demonstration tasks using different machine vision systems. The task description contains information about lighting system, design and realization of peripherals and control application programming. Both tasks were trial operated and detected problems were described in the conclusion, together with recommendations on how to improve the task or fix the problem.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	11
Úvod	12
1 Rešerše komerčně dostupných systémů strojového vidění	13
1.1 Kamerové senzory	13
1.1.1 Cognex Checker	14
1.1.2 Banner iVu	14
1.1.3 Omron FQ	15
1.1.4 Siemens Simatic VS120	17
1.1.5 SICK Inspector	18
1.1.6 Balluff BVS-E	19
1.1.7 Baumer VeriSens	20
1.2 Inteligentní kamery	21
1.2.1 Banner Presence PLUS P4 Omni	22
1.2.2 Omron Xpectia – Lite	23
1.2.3 Cognex In-Sight Micro	24
1.2.4 PPT Vision A-Series	25
1.2.5 National Instruments NI 17XX Smart Camera	26
1.3 Systémy s průmyslovými kamerami	27
1.3.1 Průmyslové kamery	28
1.3.2 Objektivy	32
1.3.3 Sběrnice pro přenos digitálních informací	36
1.3.4 Karty pro zachytávání obrazu	38
1.3.5 Vision systémy	41
1.3.6 Software	45
1.4 Osvětlení	48
1.4.1 Typy vyzařovaného světla	48
1.4.2 Typy osvětlení	51
1.4.3 Způsoby osvětlení	54
2 Aktuálně dostupné systémy strojového vidění na katedře robototechniky	57
2.1 Pracoviště ABB IRB 140	57
2.1.1 Basler A601 fc	57
2.1.2 Fujion HF16HA-1B	58

2.1.3	Prstencové osvětlení	59
2.1.4	National Instruments NI 1454	60
2.1.5	NI Vision I/O Terminal Block.....	61
2.1.6	Telemecanique XUM-LH0451	62
2.1.7	PC pro programování CVS.....	62
2.2	Pracoviště ABB IRB 360	63
2.2.1	Kamera Basler scA1300- 32gc	64
2.2.2	Fujion HF9HA-1B.....	64
2.2.3	PC pro zpracování obrazu	65
2.2.4	Software pro zpracování obrazu ABB Pickmaster 3	66
2.2.5	Informační tok na pracovišti.....	66
3	Demonstrační úloha na pracovišti ABB IRB 140	67
3.1	Systém strojového vidění.....	68
3.1.1	Osvětlení – box.....	69
3.1.2	Program	74
3.2	Dopravník – zapojení, popis, vodička	83
3.2.1	Příslušenství.....	83
3.3	Levý robot.....	84
3.3.1	Efektor s přísavkou.....	84
3.3.2	Ejektor	85
3.3.3	Nakládací šablona.....	85
3.3.4	Program	87
3.4	Pravý robot.....	88
3.4.1	Efektor Schunk PGN80	88
3.4.2	Systém rychlé výměny efektorů Schunk SWS 005	90
3.4.3	Pneumatický rozvaděč CKD Valve 4SA129.....	90
3.4.4	Optická závora pro detekci kostek	91
3.4.5	Vykládací šablona	91
3.4.6	Program	91
3.5	Simulace pracovní úlohy v prostředí ABB Robot Studio.....	93
3.6	HMI.....	94
3.6.1	Funkce	95
3.6.2	Popis rozhraní	95
3.6.3	Struktura programu.....	96

3.6.4	Kontrola výběru kostek	97
3.6.5	Komunikace s periferiemi	105
4	Demonstrační úloha na pracovišti ABB IRB 360	108
4.1	Box s kamerou a osvětlením	108
4.2	Robot ABB IRB 360	111
4.2.1	Efektor s přísavkou	111
4.3	Pásový dopravník	112
4.4	Programování robotizovaného pracoviště	112
5	Závěr	117
6	Použité zdroje	118
7	Seznam příloh	122

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Název/význam
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CDI	Continuous Diffuse Illuminator
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
COM port	Communication Port
CVS	Compact Vision Systém
DI	Digital Input
DO	Digital Output
DOAL	Diffuse On-Axis Lighting (druh osvětlovače)
DVD	Digital Video Disc
GigE	Gigabit EtherNet
HMI	Human Machine Interface (rozhraní člověk – stroj)
I/O	Input/Output
LED	Light-Emitting Diode
QR	Quick Response
RAID	Redundant Array of Independent Disks (metoda zálohy dat na pevném disku)
Rapid	Programovací jazyk robotů ABB
Robtarget	Datový typ pro souřadnice bodu pohybu
ROI	Region of Interest (oblast vymezující provedení obrazové analýzy)
SCDI	Square Continuous Diffuse Illuminator (druh osvětlovače)
Trigger	Digitální signál určený pro pořízení snímku
TTL	Transistor-Transistor Logic (standard pro implementaci digitálních obvodů)
USB	Universal Serial Bus
Workobject	Datový typ pro souřadnice pracovního objektu

Úvod

Strojové vidění patří neoddiskutovatelně mezi perspektivní a dynamicky se rozvíjející odvětví průmyslové automatizace. Významně se podílí na zvyšování kvality a její kontrole, maximalizaci efektivity a minimalizaci vynaložených nákladů. Popsané výhody technologie jsou plně v souladu s požadavky dnešní doby, a proto se nelze divit, že po daných produktech existuje zvýšená poptávka.

Výsledkem zájmu zákazníků je široká nabídka výrobků od jednoduchých a cenově poměrně nenáročných čteček čárových, popř. QR kódů až po sofistikované kamerové systémy schopny snímat obraz ve vysoké kvalitě a provádět jeho analýzu v desetinách sekundy. Systémový integrátor by tedy měl znát aktuální nabídku trhu a pro konkrétní požadavky zákazníka zvolit optimální řešení, čímž lze při návrhu ušetřit nemalé množství nákladů.

1 Rešerše komerčně dostupných systémů strojového vidění

Pro lepší pochopení problematiky strojového vidění je nutno znát současné trendy a postupy při návrhu vhodného hardware. K tomu slouží provedená rešerše zabývající se současnou nabídkou předních výrobců systémů strojového vidění a osvětlení. Základním prvkem je zdroj obrazu. V současné době je možno zdroje obrazu strojového vidění rozdělit na:

- Kamerové senzory
- Inteligentní kamery
- Systémy s průmyslovými kamerami

1.1 Kamerové senzory

Nejjednodušší a cenově nejpříjemnější variantou systému strojového vidění jsou kamerové senzory. Používají se pro jednoduché aplikace (např. zjišťování přítomnosti a správné orientace kontrolovaných objektů, kontrola rozměrů apod.). Výhodou je integrace všech prvků systému strojového vidění do jednoho modulu (Obr. 1-1). Provedení bývá nejčastěji minimalistické, do plastového šasi (speciální modely mohou mít také šasi z hliníkových slitin, popř. z nerezové oceli) je umístěna kamera s veškerou elektronikou, objektivem a LED osvětlením.



Obr. 1-1: Kamerový senzor

Programování inspekční úlohy je velmi jednoduché, rychlé a intuitivní díky absenci složitějších funkcí analýzy obrazu a celkové nenáročnosti úloh, pro které jsou zařízení určena. Princip analýzy spočívá nejčastěji v porovnávání aktuálního snímku se snímkem referenčním, kde se označí charakteristická oblast objektu (slouží k poznávání objektů) a další oblasti, kde se bude provádět kontrola. Pro komunikaci obvykle slouží několik digitálních vstupů a výstupů, popř. gigabitový EtherNet. Cenová hladina kamerových senzorů se pohybuje od cca 20 000 Kč za jednoúčelové senzory bez možnosti změny orientace objektu až do cca 90 000 Kč za systémy zvládající kontrolovat více oblastí najednou za proměnlivých podmínek (poloha a orientace objektů).

1.1.1 Cognex Checker

Produkty série Checker jsou kamerové senzory pro jednoduché inspekční úlohy. Přesto již od základních verzí nabízí užitečné funkce jako např. adaptace na změnu polohy a orientace zkoumaného objektu, možnost provádění více inspekcí najednou nebo možnost inspekce až 6 000 součástí za minutu. Programování se provádí prostřednictvím velmi jednoduchého rozhraní One Click Setup a to buď prostřednictvím PC nebo pomocí dotykového panelu SensorView Teach Pendant. Senzory Cognex Checker dále vynikají svou kompaktností a stupněm krytí IP 67. Senzor je znázorněn na Obr. 1-2. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v Tab. 1-1 [19].



Obr. 1-2: Cognex Checker

Název:	Checker 3G, Checker 4G
Výrobce:	Cognex Corporation
Obrazový snímač:	neuveden
Inspekční funkce:	přítomnost, měření, rozpoznávání znaků, učení se během inspekce
Počet uložených inspekcí:	8 (řada 3G), 32 (řada 4G)
I/O:	I: enkodér (řada 4G), externí trigger (všechny), vzdálené učení (všechny) O: 3 reléové DO 0/24V 100 mA, všechny I/O optoizolovány
Komunikace:	EtherNet/IP, PROFINET (pouze řada 4G)
Výkonnost:	800 ks/min, 6000 ks/min (pouze produkty 3G1 a 4G1)
Max. rozlišení:	128 x 101 (3G1, 4G1); 752 x 480 (3G7, 4G7)
Rozměry:	67 x 60 x 41 mm
Programování:	PC, SensorView Teach Pendant (pouze řada 3G)
Další:	možnost ukládat data na FTP server
Stupeň krytí:	IP 67
Teplota okolí:	0 – 50°C
Napájení:	24V (22-26V); 250mA
Příslušenství:	SensorView Teach Pendant, kabely, objektivy, barevné filtry, držák
Cenová hladina:	cca 20 000,- Kč (série 3G, cena v roce 2009 [36])

Tab. 1-1: Technické parametry produktu Cognex Checker 3G, 4G

1.1.2 Banner iVu

Americká firma Banner se v oboru strojového vidění specializuje především na výrobu fotoelektrických a kamerových senzorů. Zajímavé řešení představuje produkt iVu, který ve své integrované verzi zahrnuje 2,7" dotykový displej, sloužící k programování inspekční úlohy. V případě nutnosti použití menšího senzoru existuje také oddělená verze se 3,5" displejem, spojeným s kamerovým senzorem pomocí kabelu. Odpadá tak nutnost programování pomocí PC nebo externích panelů. Na Obr. 1-3 je vidět jak integrovanou verzi (vlevo), tak oddělenou verzi (vpravo). Podrobné technické parametry jsou uvedeny v Tab. 1-2 [32].



Obr. 1-3: Banner iVu

Název:	iVu Integrated TG, iVu Plus Integrated TG (integrované verze) iVu Remote TG, iVu Plus Remote TG (oddělené verze)
Výrobce:	Banner
Obrazový snímač:	1/3" CMOS
Inspekční funkce:	přítomnost, detekce škrábnců, rozpoznávání vzorů, učení se během inspekce, třídění (třídění pouze u verze Plus)
Počet uložených inspekci:	30 (pouze verze Plus)
I/O:	I: externí trigger, vzdálené učení O: 3 DO (nespecifikovány), blesk (5V/150mA)
Komunikace:	USB 2.0 host, RS 232, EtherNet (EtherNet pouze u verzí Plus)
Výkonnost:	100 snímků/s
Max. rozlišení:	752 x 480
Rozměry:	95 x 81 x 52 mm
Programování:	PC, dotykový displej (2,7" integrované verze, 3,5" oddělené verze)
Stupeň krytí:	IP 67
Teplota okolí:	0 – 50°C
Napájení:	10-30V; 800mA, 850mA (verze Plus)
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, I/O modul (komunikace RS-232)
Cenová hladina:	cca 24 000,- Kč (cena v roce 2009 [36])

Tab. 1-2: Technické parametry produktu Banner iVu

1.1.3 Omron FQ

Nadnárodní korporace Omron (původem z Japonska) se již téměř 100 let zabývá výrobou průmyslové sensoriky, elektronických komponent a zdravotnických zařízení. V oblasti strojového vidění, konkrétně kamerových senzorů, firma nabízí model FQ. Produkt obsahuje 1/3" CMOS obrazový senzor s podáním barev True Color s možností vyhodnocovat HDR snímky. Komunikace s okolím probíhá pomocí sítě EtherNet, popř. prostřednictvím digitálních vstupů a výstupů. Součástí výbavy je také výkonné LED osvětlení. Senzor je znázorněn na Obr. 1-4 a jeho technické údaje obsahuje Tab. 1-3 [25].



Obr. 1-4: Omron FQ

Název:	FQ-S1, FQ-S2
Výrobce:	Omron
Obrazový snímač:	1/3" CMOS, barevný – 16,7 miliónů barev
Inspekční funkce:	tvar, pozice, hrany, velikosti, barvy, měření
Počet probíhajících inspekci:	1 (řada S1 – řada nemá kompenzaci pozice), 32 (řada S2)
I/O:	I: externí trigger, 6 uživatelsky definovaných DI O: 3 DO (parametry signálů nespecifikovány)
Komunikace:	EtherNet 10/100
Výkonnost:	1000 ks/min, 20 snímků/s
Max. rozlišení:	752 x 480
Rozměry:	108 x 57 x 46 mm
Programování:	PC, dotyková obrazovka TouchFinder
Stupeň krytí:	IP 67
Teplota okolí:	0 – 50°C
Napájení:	20,4 – 26,4V; max. 2,4A (vč. osvětlení)
Príslušenství:	dotyková obrazovka TouchFinder, kabely, objektivy, barevné filtry, držák, polarizační sklo
Cenová hladina:	cca 30 000,- Kč – 60 000,- Kč (dle typu [52])

Tab. 1-3: Technické parametry produktu Omron FQ-S1, FQ-S2

1.1.4 Siemens Simatic VS120

V současné době nabízí společnost Siemens, původem z Německa, v oblasti strojového vidění pouze 1 kamerový senzor SimaticVS120. Při porovnání s konkurenčními modely na první pohled zaujme odlišná koncepce zařízení (kamera a externí vyhodnocovací jednotka), nicméně princip programování je totožný s ostatními výrobky a inspekce probíhá na základě srovnávání referenčních dat s aktuálně vyfocenou situací. Pro tvorbu úloh je určeno webové rozhraní. Jednotka komunikuje prostřednictvím sítě EtherNet a sběrnic PROFIBUS a PROFINET. Na Obr. 1-5 je vidět kameru s osvětlením a vyhodnocovací jednotku. Technické parametry výrobku shrnuje Tab. 1-4 [57].



Obr. 1-5: Siemens Simatic VS120

Název:	Simatic VS120
Výrobce:	Siemens
Obrazový snímač:	1/4" CCD
Inspekční funkce:	tvar, pozice, orientace, třídění až 15 typů produktů
Počet probíhajících inspekci:	neuvedeno
I/O:	I: trigger, 7 DI (24V, PLC kompatibilní) O: 6 DO (24V, max. 0,5A, celkem max. 1,5A)
Komunikace:	EtherNet 10/100, PROFIBUS, PROFINET
Výkonnost:	20 ks/s
Max. rozlišení:	640 x 480
Rozměry:	102 x 102 x 26,5 mm osvětlení, 42 x 42 x 110 mm kamera, 170 x 140 x 76 mm vyhodnocovací jednotka
Programování:	PC, webové uživatelské rozhraní
Stupeň krytí:	IP 65 kamera a osvětlení, IP 40 vyhodnocovací jednotka
Teplota okolí:	0 – 50°C
Napájení:	24V (20,4 – 28,8V); 4A
Příslušenství:	kabely, zdroj, objektivy, držák
Cenová hladina:	cca 70 000,- Kč – 87 000,- Kč (dle typu [53])

Tab. 1-4: Technické parametry produktu Siemens Simatic VS120

1.1.5 SICK Inspector

Produkty série Inspector nadnárodní firmy SICK (sídlo v Německu) obsahují produkty téměř pro každou myslitelnou aplikaci vyžadující kamerový senzor. Může se jednat např. o pouhé navádění robotu při aplikacích „Pick and Place“, ale také po poměrně sofistikované úlohy spojující navádění s analýzou objektů nepravidelných tvarů (např. sušené ovoce). V případě práce s lesklými výrobky je možno použít variantu s difuzorem, který světelné paprsky rovnoměrně rozptýlí. Obr. 1-6 znázorňuje klasickou verzi senzoru řady Inspector (vlevo) a verzi s difuzorem (vpravo). Technické parametry všech modelů obsahuje Tab. 1-5 [61].



Obr. 1-6: SICK Inspector

Název:	Inspector I10, I20, I40, P30, PI50
Výrobce:	SICK
Obrazový snímač:	neuveden
Inspekční funkce:	přítomnost, intenzita, obrazec, orientace, analýza objektů nepravidelných tvarů, 16 – 32 referenčních objektů (dle typu)
Počet uložených inspekci:	32 (kromě typu P30)
I/O:	I: 4 x 24V (předprogramované vstupy pro trigger a vzdálené učení) O: 3 reléové DO 0/24V 100 mA, typ B
Komunikace:	EtherNet 100 MBit/s
Výkonnost:	250 snímků/s (I10, I20, I40), 200 snímků/s (PI50), 75 snímků/s (P30)
Max. rozlišení:	384 x 384 (I10, I20, P30), 640 x 480 (I40, PI50)
Rozměry:	100 x 53 x 38 mm
Programování:	PC, software SOPAS
Další:	možnost ukládat data na FTP server
Stupeň krytí:	IP 67
Teplota okolí:	0 – 45°C
Napájení:	24V ± 20%; 450mA
Příslušenství:	InspectorViewer displej, kabely, objektivy, barevné filtry, držák
Cenová hladina:	cca 20 000,- Kč (I10 Standard), cca 43 000,- Kč (I40 Flex) [56]

Tab. 1-5: Technické parametry produktu SICK Inspector

1.1.6 Balluff BVS-E

Univerzální miniaturní kamerové senzory vyrábí také společnost Balluff (původem z Německa). Její produktová řada BVS-E představuje hodně možností za relativně nízkou cenu. Dle prováděných inspekcí (a k tomu potřebných funkcí) lze vybírat konkrétní modely. Učení je jednoduché a většinou se provádí prostřednictvím PC (verze BVS-C se programuje na externím dotykovém panelu). Obrazový snímač je ve všech případech černobílý, typ CMOS. Ke kamerovým sensorům nabízí firma Balluff široký sortiment příslušenství, především osvětlení. Produkt je znázorněn na Obr. 1-7 a jeho technické parametry jsou obsaženy v Tab. 1-6 [17].



Obr. 1-7: Balluff BVS-E

Název:	BVS-E, BVS-E Advanced, BVS-C, BVS-E Identification
Výrobce:	Balluff
Obrazový snímač:	CMOS monochromatický
Inspekční funkce:	přítomnost, poloha (včetně ověření), kontrola potisků, kompletnosti, obrysu, počítání hran, jas a kontrast, porovnání šířky, kontrola znaků (kontrola znaků pouze ve verzích BVS-C a BVS-E Identification)
Počet uložených inspekcí:	20
I/O:	I: 1 x trigger, 1 x DI (volba paměti), max proudový odběr I/O: 100 mA O: 4 x DO (z toho 1 osvětlení - do verze 2.0 TTL, od verze 2.0 24V)
Komunikace:	EtherNet 10/100 Base T
Výkonnost:	15 snímků/s
Max. rozlišení:	640 x 480
Rozměry:	58 x 52 x 40 mm
Programování:	PC, verze BVS-C programátor
Další:	Teach a resetovací tlačítko
Stupeň krytí:	IP 54
Teplota okolí:	-10 – 55°C
Napájení:	24V ± 10%; 200mA
Příslušenství:	programátor, kabely, objektivy, barevné filtry, držáky, osvětlení
Cenová hladina:	cca 19 000,- Kč – 30 000,- Kč (podle verze) [17]

Tab. 1-6: Technické parametry produktu Balluff BVS-E

1.1.7 Baumer VeriSens

Švýcarská korporace Baumer, tradiční výrobce průmyslové sensoriky, nabízí kamerové senzory řady VeriSens. Na první pohled senzory vynikají robustní konstrukcí a precizním zpracováním. Co se týče vlastních možností obrazových analýz, produktová řada obsahuje všechny důležité funkce a nástroje. I nejjednodušší modely umí např. kontrolovat přítomnost daného počtu pinů na integrovaných obvodech, popř. vykonávat měřicí inspekce. Z řady kamerových senzorů vyniká model Stainless Steel, znázorněný na Obr. 1-8, jehož pouzdro je z nerezové oceli a krytování IP 69K. Technické parametry senzoru jsou uvedeny v Tab. 1-7 [60].



Obr. 1-8: Baumer VeriSens

Název:	VeriSens
Výrobce:	Baumer
Obrazový snímač:	CCD
Inspekční funkce:	přítomnost, poloha (včetně ověření, měření úhlů), kontrola potisků, kompletnosti, obrysu, počítání hran, jas a kontrast, porovnání šířky, kontrola znaků (liši se dle modelů)
Počet uložených inspekci:	255
I/O:	I: 1 x trigger, 1x volba programu, 1 x vzdálené učení, Enkodér (CH-A a B) O: 5 x DO (Pass/Fail, alarm, ready), 2 x osvětlení + 1 x synchronizace
Komunikace:	EtherNet 10 (Base T) /100 (Base TX)
Výkonnost:	7 inspekci/s (1600 x 1200 px, HI-RES Mode) – 100 inspekci/s (640 x 480 px, HI-SPEED Mode)
Max. rozlišení:	640 x 480 – 1600 x 1200 (dle modelu)
Rozměry:	100 x 53 x 50 mm
Programování:	PC
Další:	funkční moduly pro PLC Siemens SIMATIC S7
Stupeň krytí:	IP 69K, IP 67 (dle modelů)
Teplota okolí:	5 – 50°C
Napájení:	18 - 30V DC; 5 W
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, držáky, osvětlení
Cenová hladina:	nezjištěna

Tab. 1-7: Technické parametry produktu Baumer VeriSens

1.2 Inteligentní kamery

V okamžiku, kdy možnosti uvedených kamerových senzorů nepostačují potřebám konkrétní inspekční úlohy, je nutno použít výkonnější nástroje strojového vidění. Tuto možnost představují inteligentní kamery (viz Obr. 1-9). Obdobně jako kamerové senzory, jsou i inteligentní kamery vyráběny v provedení s integrovanou nebo samostatnou vyhodnocovací jednotkou. Mezi hlavní rozdíly pak patří použití výkonnějších procesorů, jež zvládnou provádět sofistikovanější druhy analýz strojového vidění a obvykle větší možnosti komunikace s periferiemi a nadřazeným řídicím systémem. Obvykle je k dispozici několik průmyslových sítí, sériová linka a rozšířený počet digitálních vstupů a výstupů, které mohou být, podobně jako kamerové senzory, jak v úrovních TTL (v průmyslových podmínkách je většinou nutný převodník úrovní s galvanickým oddělením) nebo výstupy s otevřeným kolektorem (PNP nebo NPN) s napětím do cca 30V.

Další zásadní změnu představuje programování inteligentní kamery, které se provádí v dodaném software v externím PC. Díky používání sofistikovanějších nástrojů se úměrně zvyšují požadavky na programátora. Přesto se výrobci snaží o názornost a intuitivnost. Většina inteligentních kamer je vybavena výstupem pro monitor (většinou VGA), prostřednictvím kterého lze snadno vizualizovat proces inspekce. Mnohdy jde fotografii zkoumaného kusu doplnit o uživatelsky definovanou zprávu, která pozorovatele informuje o shodě daného výrobku s definovanými parametry, popř. upozorňuje na to, který prvek součásti se s parametry neshoduje.



Obr. 1-9: Inteligentní kamera

1.2.1 Banner Presence PLUS P4 Omni

Série PresencePLUS P4 výrobce Banner výkonově navazuje na výkonově slabší sérii kompaktních kamerových senzorů iVu. Verze Omni zvládá úlohy měření, zjišťování polohy a orientace, analýzu barev, poznávání textu a čárových kódů. Dále umožňuje použití logiky a matematických funkcí. Komunikace probíhá po EtherNetu nebo sériové lince, popř. je možno využít omezený počet digitálních vstupů a výstupů. Existují 2 varianty provedení – zalomená, kde se objektiv šroubuje kolmo do šasi a přímá, kde objektiv a šasi tvoří jednu linii (viz Obr. 1-10). Technické parametry senzoru PresencePLUS P4 Omni shrnuje Tab. 1-8 [49]. Kromě verze Omni existují také verze AREA, GEO, EDGE a BCR. Tyto verze jsou poměrně jednoúčelové a software obsahuje pouze funkce používané pro daný účel inspekce. Pro potřeby malého senzoru existuje verze P4 Pro. V případě nasazení v nepříznivých podmínkách se vyrábí verze P4 Sealed Omni (stupeň krytí IP 68).



Obr. 1-10: Banner Presence PLUS P4 Omni

Název:	PresencePLUS P4 Omni, PresencePLUS P4 Omni 1.3
Výrobce:	Banner
Obrazový snímač:	CMOS
Inspekční funkce:	zjišťování polohy a orientace, analýza barev a kontrastu, poznávání textu a čárových kódů, matematické funkce, logické funkce
Počet uložených inspekceí:	999 (32 MB vnitřní paměti)
I/O:	I: externí trigger, vzdálené učení, změna produktu O: 4 programovatelné I/O, blesk (5V/150mA), NTSC video
Komunikace:	RS 232, EtherNet
Výkonnost:	48 snímků/s; 26,8 snímků/s (verze 1.3)
Max. rozlišení:	640 x 480; 1280 x 1024 (verze 1.3)
Rozměry:	125 x 67 x 56 mm (zalomená verze); 148 x 67 x 34 mm (přímá verze)
Programování:	PC
Stupeň krytí:	IP 20
Teplota okolí:	0 –50°C
Napájení:	10-30V; 650mA, 550mA (verze 1.3), v případě napájení osvětlení 24V
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, I/O modul (komunikace RS-232)
Cenová hladina:	cca 40 000,- Kč – 70 000,- Kč (dle typu [58])

Tab. 1-8: Technické parametry produktu Banner Presence PLUS P4 Omni

1.2.2 Omron Xpectia – Lite

V oblasti inteligentních kamer nabízí firma Omron produktovou řadu Xpectia, která v sobě zahrnuje jak zde popsanou nízkonákladovou verzi Lite, tak rozšířené verze s možností použití až 70ti nástrojů pro zpracování obrazu. Všechny varianty jsou v provedení kamera + externí vyhodnocovací jednotka, která je schopna v případě Lite verze vyhodnocovat obraz až ze 4 kamer (ostatní verze umožňují použití až 4 vysokorychlostních kamer). Jednotka také ve všech verzích poskytuje široké možnosti komunikace a I/O. Na Obr. 1-11 je vidět kameru a vyhodnocovací jednotku. Technické parametry výrobku shrnuje Tab. 1-9 [55].



Obr. 1-11: Omron Xpectia – Lite

Název:	Xpectia - Lite
Výrobce:	Omron
Obrazový snímač:	1/3" CMOS, barevný – 16,7 miliónů barev
Inspekční funkce:	měření vzdálenosti, počítání součástí, detekce defektů (znečištění, deformace), kontrola alfanumerických znaků včetně odolnosti vůči odstínům znaků, hledání tvarů, rohů, hran, určení pozice, čtení 2D kódů, výpočty
Počet uložených inspekcí:	omezeno pouze pamětí
I/O:	I: 11 (RESET, STEP, DSA, 8 uživatelsky definovaných vstupů) O: 26 (RUN, BUSY, GATE, OR, READY, ERROR, STGOUT 0 - 3, 16 uživatelsky definovaných výstupů)
Komunikace:	RS 232, EtherNet 1000/100/10, 2 x USB 2.0
Výkonnost:	20 snímků/s
Max. rozlišení:	752 x 480; kameru je možno měnit
Rozměry:	197 x 182 x 80 mm (vyhodnocovací jednotka), 108 x 57 x 46 mm (kamera)
Programování:	PC
Stupeň krytí:	IP 20
Teplota okolí:	0 – 50°C
Další:	funkce HDR, možnost připojit až 4 kamery
Napájení:	20,4 – 26,4V, 5,5A max. (při 24V)
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, LCD displej
Cenová hladina:	cca 130 000,- Kč – 176 000,- Kč (dle typu [54])

Tab. 1-9: Technické parametry produktu Omron Xpectia - Lite

1.2.3 Cognex In-Sight Micro

Oblast inteligentních kamer patří mezi priority společnosti Cognex – proto společnost nabízí široké portfolio produktů s názvem Cognex In-Sight. Tato „rodina“ inteligentních kamer se dále dělí do jednotlivých řad podle náročnosti aplikace a rozměrů systémů strojového vidění. Mezi ojedinělá a zajímavá řešení patří integrace systému zpracování obrazu do kamery při zachování miniaturních rozměrů samostatné kamery. Takové technické řešení reprezentuje produktová řada In-Sight Micro (viz Obr. 1-12), nabízející poměrně komplexní systém vyhodnocení obrazu v prostoru 60 x 30 x 30mm. Logickým omezením v tomto případě je počet I/O a komunikační možnosti, kamera je stavěna pro komunikaci v síti EtherNet, po které je i napájena. Technické parametry výrobku shrnuje Tab. 1-10 [30].



Obr. 1-12: Cognex In-Sight Micro

Název:	In-Sight Micro
Výrobce:	Cognex
Obrazový snímač:	1/3" CCD (verze 1020-1400), 1/1,8" (verze 1403); 8bit (ČB)/24bit (COL)
Inspekční funkce:	zjišťování přítomnosti, polohy a orientace, kontrola sestav, nástroje pro měření a výpočty (včetně měření tolerancí), analýza barev, znaků, průmyslových kódů
Počet uložených inspekcí:	neomezeně (omezení pouze 128 MB paměti)
I/O:	I: 1 x externí trigger (optooddělený), možnost rozšíření I/O modulem O: 2 x uživatelské I/O (optooddělené), možnost rozšíření I/O modulem
Komunikace:	RS 232C, EtherNet
Výkonnost:	7 – 60 snímků/s (podle verze)
Max. rozlišení:	640 x 480 (verze 1020-1400); 1600 x 1200 (verze 1403)
Rozměry:	60 x 30 x 30 mm (bez objektivu)
Programování:	PC
Stupeň krytí:	IP 51
Teplota okolí:	0 –45°C
Další:	nástroje pro spolupráci s robotem (pick-and-place, inspekce robotem)
Napájení:	48V PoE (napájeno přes EtherNet), 6,5W
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, I/O modul, dotykový panel
Cenová hladina:	nezjištěna

Tab. 1-10: Technické parametry produktu Cognex In-Sight Micro

1.2.4 PPT Vision A-Series

Výrobce inteligentních kamer a příslušenství je také americká firma PPT Vision, nabízející celkem 3 produktové řady: ekonomické řešení nabízí řada A, univerzálnost řada T a vysokou rychlost řada M. Na Obr. 1-13 je vidět inteligentní kamera ekonomické řady A (A-Series). Systém vyhodnocení obrazu je integrován do kamery a tvoří tak 1 kompaktní celek. Tělo, vyrobeno ze slitiny hliníku, zaručuje robustnost a odolnost vůči nárazům. Technické parametry výrobku shrnuje Tab. 1-11 [9].



Obr. 1-13: PPT Vision A-Series

Název:	A-Series
Výrobce:	PPT
Obrazový snímač:	1/3" CMOS (ČB)
Inspekční funkce:	čtení 2D kódů, alfanumerických znaků, měření (kontrola), analýza intenzity, hledání podle vzoru, zjišťování polohy a orientace
Počet uložených inspekcí:	neomezeně (512MB paměti)
I/O:	I: 1 x trigger, 2 x uživatelsky definovaný vstup, možné rozšíření O: 1 x blesk, 4 x uživatelsky definovaný výstup, možné rozšíření
Komunikace:	RS 232, EtherNet/IP, TCP/IP, HTTP, OPC, Modbus
Výkonnost:	69 snímků/s
Max. rozlišení:	752 x 480
Rozměry:	140 x 68 x 24 mm
Programování:	PC
Stupeň krytí:	neuvezen
Teplota okolí:	0 –50°C
Napájení:	24V; 500mA
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, I/O modul
Cenová hladina:	nezjištěna

Tab. 1-11: Technické parametry produktu PPT A-Series

1.2.5 National Instruments NI 17XX Smart Camera

Další americkou korporací, která mimo jiné vyrábí systémy strojového vidění, je National Instruments. Zde popsána je řada inteligentních kamer NI 17XX Smart Camera. Jsou zde zastoupeny jak ekonomické modely s nízkým rozlišením a omezeným výběrem funkcí při programování, univerzální modely s barevným či černobílým snímačem až po modely s velkým snímačem, či dalšími speciálními funkcemi. Pro všechny modely je charakteristická integrace systému vyhodnocení obrazu přímo do těla kamery (viz Obr. 1-14). Technické parametry výrobku shrnuje Tab. 1-12 [35].



Obr. 1-14: National Instruments Smart Camera

Název:	NI 17XX Smart Camera
Výrobce:	National Instruments
Obrazový snímač:	1/3" CCD (ČB), 1/2" CCD (ČB) – verze s vyšším rozlišením
Inspekční funkce:	segmentace obrazu, měření, rozeznávání objektů podle předlohy, detekce tvarů a hran, měření intenzity, logické a matematické funkce, čtení 2D kódů a alfanumerických znaků
Počet uložených inspekci:	128 MB vnitřní paměti
I/O:	I: 2 x optooddělený digitální vstup O: 2 x optooddělený digitální výstup
Komunikace:	Modbus/TCP, RS-232, Ethernet/IP, TCP/IP, Modbus
Výkonnost:	60 snímků/s, 13 snímků/s (verze s vyšším rozlišením)
Max. rozlišení:	640 x 480, 1280 x 1024
Rozměry:	118 x 86 x 51 mm
Programování:	PC
Stupeň krytí:	IP 20
Teplota okolí:	0 – 45°C
Další:	čítačový vstup pro enkodér (od modelu 1744 výše)
Napájení:	10-30V; 650mA, 550mA (verze 1.3), v případě napájení osvětlení 24V
Příslušenství:	kabely, objektivy, barevné filtry, I/O modul, osvětlení
Cenová hladina:	47 900,- Kč model NI 1722; 83 900,- Kč model NI 1744 [35]

Tab. 1-12: Technické parametry produktu NI Smart Camera

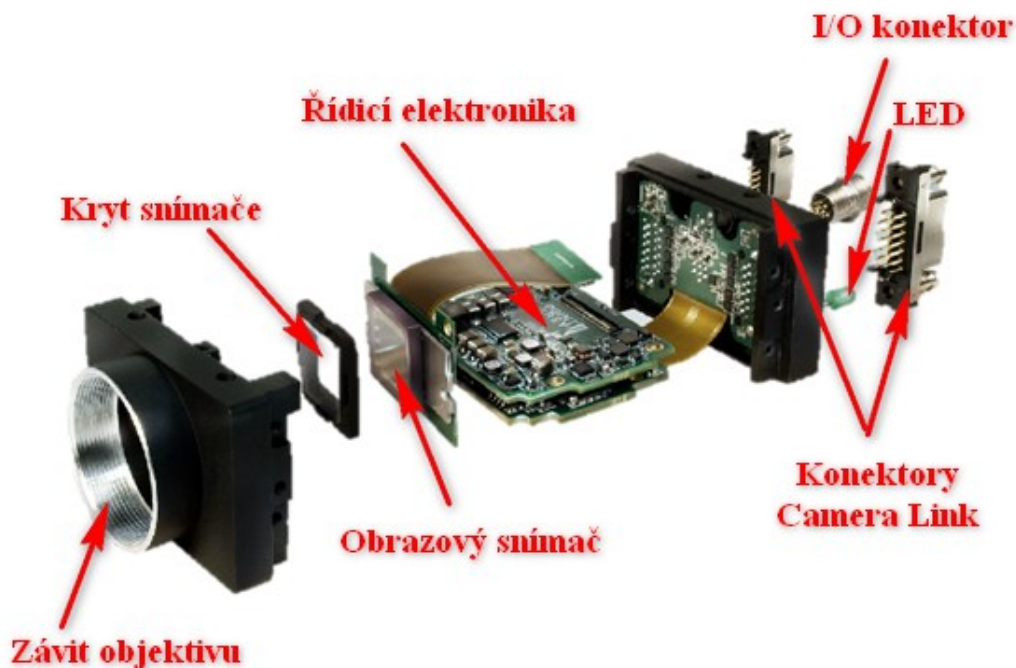
1.3 Systémy s průmyslovými kamerami

V případě řešení náročných úloh vyžadujících použití více kamer, popřípadě je-li výhodná integrace systému strojového vidění do hlavního řídicího systému, pozbývá vlastní „inteligence“ kamery smysl. Proto existuje skupina průmyslových kamer jakožto zařízení sloužících pouze pro zachycení obrazové informace, její digitalizaci a odeslání do vyhodnocovacího systému. Vše je umístěno do odolného krytu. Typická průmyslová kamera je na Obr. 1-15. V dnešní době jsou průmyslové kamery v katalogích jednotlivých producentů dále děleny a to především podle způsobu jejich komunikace s nadřazeným vyhodnocovacím systémem. Za průmyslový standard lze pokládat kamery s výstupem Camera Link, USB 3.0, Gigabit Ethernet (dále jen GigE) a FireWire.

Systémy vyhodnocení obrazu (také známy jako PC Vision systémy) jsou blíže popsány v kap. 1.3.4 a 1.3.5. V zásadě může být použito klasické, popř. průmyslové PC se speciálním hardware a software nebo externí modul vyhodnocení obrazu. Výkonnost celého systému strojového vidění je tak závislá na každé použité komponentě. Vzhledem k vývoji v oblasti strojového vidění, používání průmyslových kamer je stále ve větší míře nahrazováno kamerovými senzory a inteligentními kamerami, protože jejich výkon již postačuje pro většinu aplikací.

Zvláštním řešením strojového vidění jsou individuální systémy přizpůsobené dané aplikaci a podmínkám. Pro tyto systémy se nejčastěji tvoří vlastní hardware a software.

Nutno dodat, že standardně se průmyslové kamery dodávají bez objektivu, který je zapotřebí ke kameře přikoupit dle požadavků řešené aplikace.

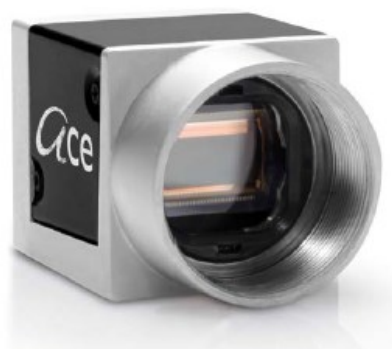


Obr. 1-15: Průmyslová kamera

1.3.1 Průmyslové kamery

Basler Ace

Jedním z předních výrobců strojového vidění, jehož zaměření je především na produkci průmyslových kamer strojového vidění, je německá firma Basler. Mediálně velmi známým produktem je kamera Basler Ace. Pod tímto názvem se konečnému uživateli nabízí celá škála variant konečného produktu, které se od sebe liší nejenom rozlišením obrazového senzoru či možností barevného záznamu, ale také lze měnit přímo typ senzoru (CCD, CMOS) a způsob komunikace (USB 3.0, GigE, Camera Link). Kamera, zobrazená na Obr. 1-16, vyniká také velmi malými rozměry a solidním tělem z hliníkové slitiny a plechového krytu. Tato série kamer (technické parametry uvedeny v Tab. 1-13 [14]) tedy může představovat určité univerzální řešení v oblasti nízkonákladových průmyslových kamer.



Obr. 1-16: Basler Ace

Název:	Ace
Výrobce:	Basler
Obrazový snímač:	CCD, CMOS s velikostí od 1/3" do 1" dle varianty
Typ závitu:	C, CS dle typu
Formát videosignálu:	Mono 8, Mono 12, Mono 12 Packed, YUV 4:2:2 Packed, YUV 4:2:2 (YUYV) Packed, Bayer BG 8, Bayer BG 12, Bayer BG 12 Packed / in addition: Bayer GB (Aptina), Bayer GR (CMOSIS), acA750-30gc: Mono 8, YUV 4:2:2 Packed, YUV 4:2:2 (YUYV) Packed only
I/O:	I: 1 x optooddělený digitální vstup O: 1 x optooddělený digitální výstup
Komunikace:	Gigabit Ethernet, Camera Link, USB 3.0
Výkonnost:	14 – 340 snímků/s
Max. rozlišení:	640 x 480 - 2592 x 1944, dle varianty
Rozměry:	55,5 x 29 x 29 mm, 54 x 29 x 29 mm, 41 x 29 x 29 mm (dle varianty)
Stupeň krytí:	IP 30
Teplota okolí:	0 – 50°C
Napájení:	napájení přes konkrétní sběrnice
Příslušenství:	ovladače, karty pro komunikaci s PC, kabely, objektiv, zdroj ...
Cenová hladina:	od 299,- EUR [14]

Tab. 1-13: Technické parametry produktu Basler Ace

Allied Vision Prosilica GT

Systémy strojového vidění obsahují, podobně jako jiné automatizační prvky, polovodičovou elektroniku, což v sobě přináší teplotní omezení. Jedno z možných řešení pro nasazení průmyslové kamery u procesů, jejichž nedílnou součástí je teplo, představuje německá firma Allied Vision Technologies s produktem Prosilica GT (znázorněný na Obr. 1-17). Jedná se o průmyslovou kameru, jež má nejen zvýšenou teplotní odolnost, ale zároveň se dokáže také rychle přizpůsobovat měnícím se světelným podmínkám (zapříčiněných např. pohybem žhavých objektů v zorném poli). Kamera je dodávána s objektivem vybaveným automatickým zaostřováním. Technické parametry shrnuje Tab. 1-14 [50]. Model Prosilica GT je vyráběn ve 14 variantách.



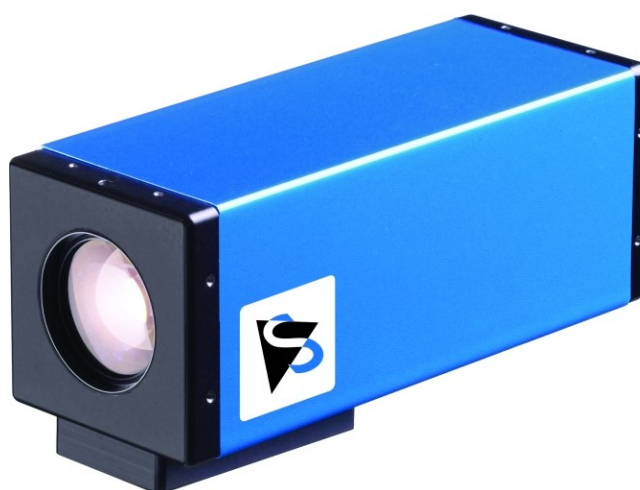
Obr. 1-17: Allied Vision Prosilica GT

Název:	Prosilica GT
Výrobce:	Allied Vision Technologies
Obrazový snímač:	CCD, s velikostí od 1/3" do 4/3" dle varianty
Formát videosignálu:	Mono8, Mono12Packed, Mono16, YUV411, YUV422, YUV444, RGB24, BGR24, RGBA32, BGRA32, Bayer8, Bayer12Packed, Bayer16
I/O:	I: 1 x optooddělený digitální vstup, 1 x TTL digitální vstup O: 2 x optooddělený digitální výstup, 2 x TTL digitální vstup
Komunikace:	Gigabit Ethernet
Výkonnost:	4 – 340 snímků/s
Max. rozlišení:	1280 x 960 - 6576 x 4384, dle varianty
Rozměry:	86 x 53.3 x 33 mm
Stupeň krytí:	IP 30
Teplota okolí:	0–65°C (některé varianty 0–60°C, popř. 0–50°C)
Napájení:	napájení přes Ethernet (7-25V DC)
Další:	128 MB vyrovnávací paměť
Příslušenství:	ovladače, karty pro komunikaci s PC, kabely, objektiv, zdroj ...
Cenová hladina:	\$1 150,- \$5 250 [12]

Tab. 1-14: Technické parametry produktu Allied Vision Prosilica GT

The Imaging Source DFK

Tradiční průmyslová kamera se skládá z vlastního pevného těla kamery, kde se nachází vlastní obrazový snímač a nezbytná elektronika, a vyměnitelného objektivu. V určitých případech výrobci nabízí průmyslovou kameru jako jeden celek. Kupříkladu americká společnost The Imaging Source nabízí kamery řady DFK, které mají objektiv integrován přímo do těla kamery (viz Obr. 1-18). V tomto případě bylo takové řešení zvoleno především kvůli funkci „zoom“ a s tím spojeným použitím motorizovaného objektivu. Ohnisková vzdálenost se může měnit v rozmezí 5 – 45 mm. Kamera je vhodná pro aplikace, kde je zapotřebí identifikovat a kontrolovat několik typů různě velkých objektů. Jelikož je další alternativa použít na každý objekt samostatnou kameru, je jak z hardwarového, tak ze softwarového hlediska výhodnější využít jeden přístroj vybaven funkcí „zoom“. Kromě jmenované funkce zvládne kamera i automaticky zaostřovat na snímané objekty. Další technické parametry obsahuje Tab. 1-15 [24].



Obr. 1-18: The Imaging Source DFK

Název:	DFK XXXXXX-Z
Výrobce:	The Imaging Source
Obrazový snímač:	CCD, s velikostí od 1/4" do 1/3" dle varianty
Formát videesignálu:	UYVY, BY8
I/O:	volitelně (podrobnosti neuvedeny)
Komunikace:	FireWire
Výkonnost:	30 snímků/s (1024 x 768); 60 snímků/s (640 x 480)
Max. rozlišení:	640 x 480 - 1280 x 768, dle varianty
Rozměry:	114 x 50,6 x 50,6 mm
Stupeň krytí:	nenalezeno
Teplota okolí:	-5 – 45°C
Napájení:	8-30V DC
Další:	zoom, automatické zaostřování
Příslušenství:	ovladače, karty pro komunikaci s PC, software, kabely ...
Cenová hladina:	€570,- €830 [24]

Tab. 1-15: Technické parametry produktu The Imaging Source DFK

Point Grey Bumblebee2

Některé firmy nabízí, kromě standardní produkce, také vysoce speciální průmyslové kamery. Takovým výrobcem je např. kanadská společnost Point Grey. Vedle produkce klasických kamer nabízí také kamery, resp. kamerové systémy pro velmi specifické aplikace. Série Ladybug obsahuje kamerové systémy pro sférické záznamy (každý systém obsahuje 6 kamer). Obdobné kamerové systémy používá např. firma Google při tvorbě „Street View“ [28]. Série ProFUSION nabízí čtvercové pole čítající celkem 25 kamer a komunikující po sběrnici PCI Express. Produkty zde popisované série Bumblebee2, zobrazené na Obr. 1-19, umožňují stereo vidění. Sloučením snímků z levé a pravé kamery vznikne trojrozměrný obraz, u kterého lze pomocí softwarových nástrojů určovat vzdálenost objektů od kamery. Toto může být užitečné například při navigaci mobilních robotů, identifikaci 3D objektů a sledování osob. Velmi výhodné je také použití kamerového systému v průmyslové robotice při náhodném odeírání vzájemně se překrývajících polotovarů. Výhodou stereo vidění je také menší vliv stínu a špatných světelných podmínek na obraz. Technické parametry kamerových systémů typu Bumblebee2 shrnuje Tab. 1-16 [47].



Obr. 1-19: Point Grey Bumblebee 2

Název:	Bumblebee2
Výrobce:	Point Grey
Obrazový snímač:	CCD, 1/3"
Formát videosignálu:	640x480: YUV411, YUV422, RGB, Y8, Y16 1024x768: YUV422, RGB, Y8, Y16 zpracování příloženými nástroji Triclops Stereo SDK a FlyCapture SDK
I/O:	4 nastavitelné I/O (v případě použití RS 232 pouze 2)
Komunikace:	FireWire, RS 232
Výkonnost:	20 snímků/s (1024 x 768); 48 snímků/s (640 x 480)
Max. rozlišení:	1024 x 768
Rozměry:	157 x 47,4 x 36 mm
Stupeň krytí:	nenalezeno
Teplota okolí:	0–45°C
Napájení:	napájení přes FireWire nebo externě (8-30V DC)
Další:	128 MB vyrovnávací paměť
Příslušenství:	ovladače, karty pro komunikaci s PC, kabely ...
Cenová hladina:	\$1 895,- \$2 395 (+\$100 za softwarové nástroje) [16]

Tab. 1-16: Technické parametry produktu Point Grey Bumblebee 2

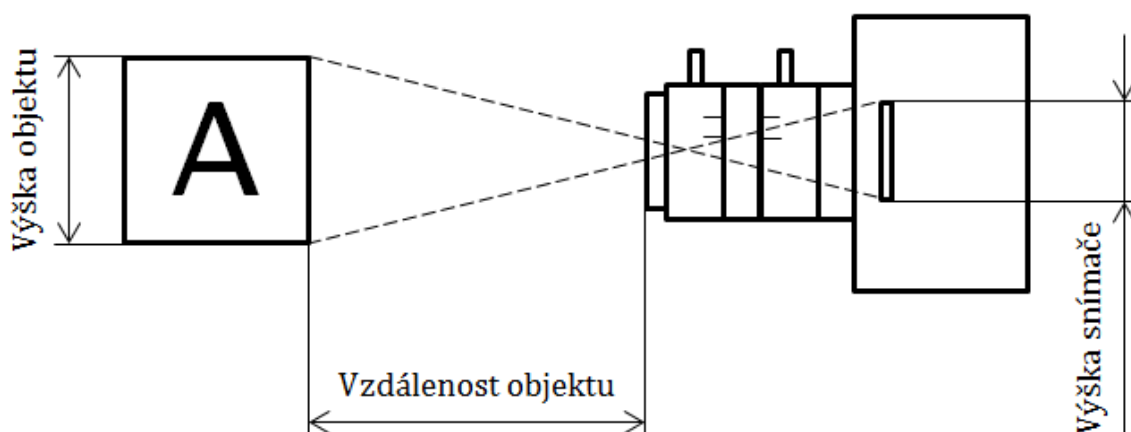
1.3.2 Objektivy

Jak již bylo řečeno, naprostá většina průmyslových kamer je dodávána bez objektivu. Správný výběr objektivu je další důležitou záležitostí nezbytnou pro výborný výsledek dané aplikační úlohy. Typický objektiv určený pro průmyslové kamery je na Obr. 1-20. Při výběru objektivu se musí věnovat pozornost především typu závitu objektivu, ohniskové vzdálenosti (včetně zvážení nutnosti zoomu), velikosti obrazového snímače kamery, světelnosti objektivu a typem clony (manuální, automatická).



Obr. 1-20: Objektiv pro průmyslové kamery

Některé hodnoty jsou dané konkrétním typem kamery. Jedná se o velikost obrazového snímače a typ závitu (většinou typ C nebo CS). V ojedinělých případech lze na kameru se závitem CS přišroubovat redukci na závit C, čímž se ale zvětší ohnisková vzdálenost. Redukce na závit objektivu CS pro kameru se závitem C neexistuje. Rovněž funkce automatického zaostřování objektivu, popř. nastavení clony musí být kamerou podporována. Ohnisková vzdálenost se určuje podle velikosti snímaného objektu, velikosti obrazového snímače a vzdálenosti objektivu od snímaného objektu. Metodika výpočtu byla převzata z materiálů firmy The Imaging Source [63]. Pro názornost je situace znázorněna na Obr. 1-21.



Obr. 1-21: Výpočet ohniskové vzdálenosti objektu

Její výpočet se pak řídí vztahy:

$$\text{Ohnisková vzdálenost objektu (výška)} = \frac{\text{Vzdálenost objektu} \times \text{Výška snímáče}}{\text{Výška objektu} + \text{Výška snímáče}} \quad (1.1)$$

$$\text{Ohnisková vzdálenost objektu (šířka)} = \frac{\text{Vzdálenost objektu} \times \text{Šířka snímáče}}{\text{Šířka objektu} + \text{Šířka snímáče}}$$

Celková ohnisková vzdálenost je rovna menší hodnotě ohniskových vzdáleností objektu na délku a na šířku. Pro informaci jsou velikosti běžných snímačů uvedeny v Tab. 1-17.

Velikost snímáče:	Výška snímáče [mm]:	Šířka snímáče [mm]:
1/4"	2,4	3,2
1/3"	3,6	4,8
1/2"	4,8	6,4
2/3"	6,6	8,8
1"	9,6	12,8
4/3"	13,5	18

Tab. 1-17: Velikosti běžných snímačů

V případech, kdy se musí hodnotit více objektů různých velikostí je na zvážení použití průmyslové kamery s automatickým zoomem. Příklad takové kamery je na str. 30 (The Imaging Source DFK).

Výběr světelnosti objektivu záleží na zkušenostech výrobce, na charakteru řešené úlohy a především na kvalitě osvětlení. Obecně lze říci, že světelnost je přímo úměrná ceně.

Objektivy se pořizují u výrobců průmyslových kamer (obvykle mívají skladem osvědčené typy) nebo přímo u výrobců objektivů. Podobně jako u průmyslových kamer byly jako příklad vybrány některé modely předních světových výrobců.

Pentax Ricoh FL-CC1614-2M

Tento jednoduchý objektiv, vyráběný japonskou firmou Pentax, nabízí ke svým produktům např. firma Basler. Jedná se o objektiv s fixním ohniskem a ručně nastavitelnou clonou a zaostřováním. Dále se vyznačuje výbornou světelností a relativně nízkou cenou. Objektiv je znázorněn na Obr. 1-22. Technické parametry shrnuje Tab. 1-18 [8].



Obr. 1-22: Pentax Ricoh FL-CC1614-2M

Název:	FL-CC1614-2M
Výrobce:	Pentax
Rozměry:	29,5 x 33,2 mm
Ohnisková vzdálenost:	16 mm
Rozsah clony:	F1,4 - 16
Velikost snímáče:	2/3“
Závit objektivu:	C
Nastavení clony:	ruční
Zaostřování:	ruční
Min. vzdálenost objektu:	250 mm
Cena:	€152 [8]

Tab. 1-18: Technické parametry produktu Pentax Ricoh FL-CC1614-2M

Tamron 23FM50SP

Obdobný objektiv Tamron 23FM50SP, znázorněný na Obr. 1-23 vyrábí japonská firma Tamron. Technické parametry shrnuje Tab. 1-19 [59].



Obr. 1-23: Tamron 23FM50SP

Název:	23FM50SP
Výrobce:	Tamron
Rozměry:	77,5 x 34 mm
Ohnisková vzdálenost:	50 mm
Rozsah clony:	F2,8 - 32
Velikost snímáče:	2/3"
Závit objektivu:	C
Nastavení clony:	ruční
Zaostřování:	ruční
Min. vzdálenost objektu:	250 mm
Cena:	\$ 143 [59]

Tab. 1-19: Technické parametry produktu Tamron 23FM50SP

Fujinon CF12.5HA-1

Dalším významným výrobcem je japonská firma Fujifilm. V portfoliu produktů lze nalézt také model Fujinon CF12.5HA-1, což je objektiv určený pro kamery s velkým snímačem (do 1"). Produkt je znázorněn na Obr. 1-24 a technické parametry uvedeny v Tab. 1-20 [26].



Obr. 1-24: Fujinon CF12.5HA-1

Název:	CF12.5HA-1
Výrobce:	Fujifilm
Rozměry:	120 x 19 mm
Ohnisková vzdálenost:	12,5 mm
Rozsah clony:	F1,4 - 22
Velikost snímáče:	1"
Závit objektivu:	C
Nastavení clony:	ruční
Zaostřování:	ruční
Min. vzdálenost objektu:	100 mm
Cena:	\$ 284 [26]

Tab. 1-20: Technické parametry produktu Fujinon CF12.5HA-1

1.3.3 Sběrnice pro přenos digitálních informací

V dnešní době obsahuje naprostá většina systémů strojového vidění digitální kamery, které zachycenou scénu okamžitě přenáší do formy digitální informace. V případě průmyslových kamer se informace přenášejí po sběrnících USB 3.0, GigE, FireWire (IEEE1394b) a Camera Link. Každý typ má své výhody a nevýhody, ke kterým je nutno při výběru průmyslové kamery přihlížet. Jednoduchý přehled základních technických parametrů jednotlivých sběrnic je uveden v Tab. 1-21 [37]. Krátký popis jednotlivých sběrnic je uveden v následujících odstavcích.

	FireWire	GigE	USB 3.0	Camera Link
Datová propustnost:	80 MB/s	125MB/s	440MB/s	820MB/s
Max. délka kabelu:	4,5 m	100 m	3 m	10 m
Zátěž procesoru:	nízká	střední	nízká	střední
Oblíbenost u zákazníků:	klesající	vysoká	vysoká	malá
Složitost integrace:	střední	nízká	nízká	vysoká
Napájení po sběrnici:	45 W	15,4 W	4,5 W	4 W
Podpora více kamer:	výborná	dobrá	výborná	ucházející
Cenová náročnost (na 1 kameru):	střední	střední	nízká	vysoká
Název protokolu:	IIDC DCAM	GigE Vision	USB3 Vision	Camera Link

Tab. 1-21: Porovnání sběrnic pro digitální přenos obrazové informace

FireWire

FireWire, neboli IEEE1394 je sériová univerzální sběrnice vyvíjená společností Apple od roku 1986. Pro strojové vidění se začala používat v roce 1995, kdy představovala jedinou alternativu. Pro komunikaci mezi kamerou a PC se používá protokol IIDC DCAM. Kamery s FireWire výstupem se dají snadno nahradit jinými modely a rozhraní také umožňuje propojení více kamer. Obecně FireWire podporuje až 63 zařízení zapojených do stromové nebo „daisy chain“ topologie (sériové zapojení jednotlivých prvků), což je výhodné také při aplikacích strojového vidění (synchronizace spouště jednotlivých kamer, dobrá spolehlivost). Značka sběrnice FireWire je na Obr. 1-25.



Obr. 1-25: Značka sběrnice FireWire

Camera Link

Sběrnice Camera Link byla přímo vyvinuta pro systémy strojového vidění americkou společností Automated Imaging Association. Pro komunikaci slouží protokol camera Link. Sběrnice využívá přímého přístupu do paměti pro menší zátěž procesoru a odděluje videosignál od řídicích signálů, což se příznivě projeví na odezvě kamery. Zvýšená datová propustnost umožňuje přenášet kvalitnější obraz a proto je sběrnice vhodná pro kamery s velkým snímačem a vysokým rozlišením. Nevýhodou sběrnice Camera Link jsou vyšší pořizovací náklady. Grafická značka sběrnice Camera Link je na Obr. 1-26.



Obr. 1-26: Značka sběrnice Camera Link

GigE (Gigabit Ethernet)

Vývoj Ethernetu započal v 70. letech v USA ve společnosti Xerox Parc. Od doby uvedení na trh se protokol Ethernet masivně rozšířil do soukromých i firemních sítí. Po zvýšení datové propustnosti na 1Gb/s (Gigabit Ethernet) bylo použití sběrnice výhodné i pro systémy strojového vidění. Společnost Automated Imaging Association proto vyvinula protokol GigE Vision. Mezi hlavní výhody sběrnice patří obecná rozšířenost průmyslového Ethernetu a možnost použití dlouhých kabelů (do 100 m) a to včetně napájení, což tuto sběrnici předurčuje k použití pro delší vzdálenosti. Díky systému adresování není počet kamer v síti omezen. Značka protokolu GigE Vision je na Obr. 1-27.



Obr. 1-27: Značka protokolu GigE Vision

USB 3.0

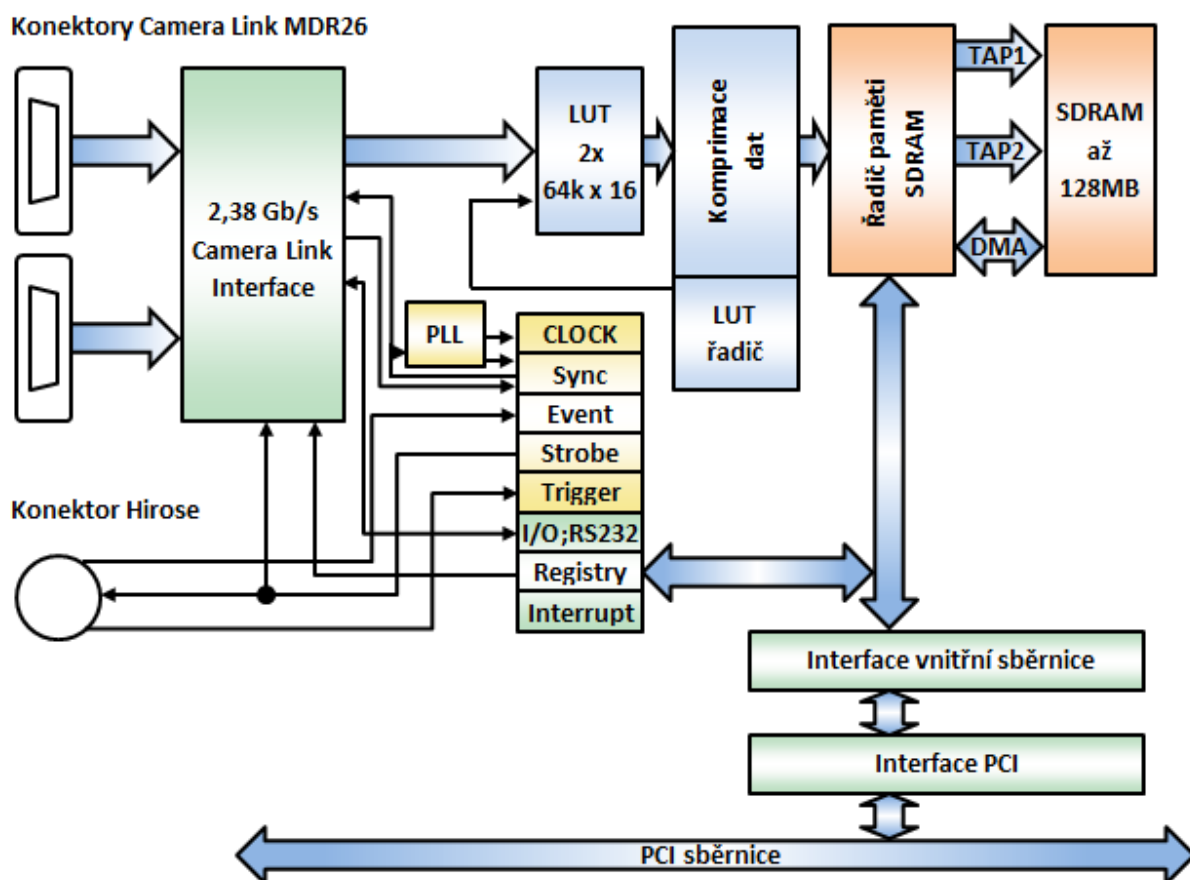
Obdobně jako v případě Ethernetu je USB (Universal Serial Bus) tradiční počítačovou sběrnici vyvíjenou od roku 1994 společnostmi Compaq, DEC, IBM, Intel, Microsoft a Nortel. V roce 2008 došlo k výraznému zvýšení datové propustnosti z 480 Mb/s na cca 440 MB/s. Tato změna vedla firmu Automated Imaging Association k vývoji komunikačního protokolu USB3 Vision (podobný GigE Vision). Výhodou rozhraní je přímý přístup do paměti (menší zatížení procesoru), velká datová propustnost, možnost zapojit kameru přímo do PC, možnost napájet kameru po sběrnici a především relativně nízká cena. Značka protokolu USB 3 Vision je na Obr. 1-28.



Obr. 1-28: Značka protokolu USB 3 Vision

1.3.4 Karty pro zachytávání obrazu

Obraz zachycený kamerou putuje ve formě digitální informace po vhodné sběrnici do systému vyhodnocení obrazu. V případě univerzálního řešení systému použitím kancelářského nebo průmyslového PC se pro příjem informace používají karty pro zachytávání obrazu (kromě kamer s rozhraním USB 3.0). Kromě konektorů pro připojení kamery jsou některé produkty vybaveny přídatnými I/O konektory, včetně možnosti připojení enkodéru. Zpracované informace z karet se přenáší do řídicího PC nejčastěji po sběrnici PCI nebo PCI Express, průmyslové verze mají výstup na sběrnici PXI. Na Obr. 1-29 se nachází blokové schéma karty zachytávající obraz ze sběrnice Camera Link s výstupem na sběrnici PCI [29]. V dalším textu následují příklady karet pro zachytávání obrazu z různých sběrnic.



Obr. 1-29: Blokové schéma karty pro zachytávání obrazu

National Instruments NI PXIe-1435

Karta NI PXIe-1435 představuje vysoce výkonný hardware určený pro použití s průmyslovými PC se sběrnici PXI Express. Zařízení umožňuje připojit jednu kameru v základní, střední, úplné nebo rozšířené konfiguraci po sběrnici Camera Link. V případě rozšířené konfigurace může být datová propustnost až 850 MB/s. Kromě konektorů Camera Link je karta vybavena také jedním 15 pinovým D-Sub konektorem, kde jsou vyvedeny digitální I/O a potřebné vstupy pro připojení kvadraturního enkodéru. Svými vlastnostmi a cenou je karta vhodná především pro složité aplikace na míru, kde je zapotřebí vysoké rozlišení a vyšší počet snímků za vteřinu. Produkt je znázorněn na Obr. 1-30. Technické údaje jsou uvedeny v Tab. 1-22 [42].



Obr. 1-30: National Instruments NI PXIe-1435

Název:	PXIe-1435
Výrobce:	National Instruments
Vstupní sběrnice:	Camera Link
Výstupní sběrnice:	PXI Express
Datová propustnost:	850 MB/s
I/O:	2 optoizolované DI 0-30V DC; 4 DI/DO TTL; 4 vstupy kvadraturního enkodéru (RS-422)
Napájení kamery:	prostřednictvím sběrnice Camera Link (PoCL), 12V, max. 4W
Příslušenství:	kabeláž Camera Link, D-Sub
Cena:	47 900,- Kč [42]

Tab. 1-22: Technické parametry produktu NI PXIe-1435

Cognex GigE Network Interface Card, PCIe x4

Firma Cognex prodává jednak vlastní karty pro zachytávání obrazu, ale také prodává produkty ostatních výrobců. Například pro kamery s Ethernetovým výstupem nabízí karty společnosti Intel, kde je zařízení vedeno pod názvem Intel PRO/1000 PT Dual Port Server Adapter. Jedná se o kvalitní gigabitovou síťovou kartu s nízkou latencí a zátěží procesoru. Hardware podporuje víceprocesorové systémy a je schopen rozkládat svůj výkon na více jader. Prostřednictvím měděných konektorů je možno připojit až 2 kamery. Porty jsou vybaveny automatickým nastavením. S řídicím PC zařízení komunikuje prostřednictvím sběrnice PCI Express. Jelikož se primárně jedná o síťovou kartu určenou pro širší použití, je toto zařízení běžně dostupné. Produkt je zobrazen na Obr. 1-31. Technické parametry obsahuje Tab. 1-23 [31].



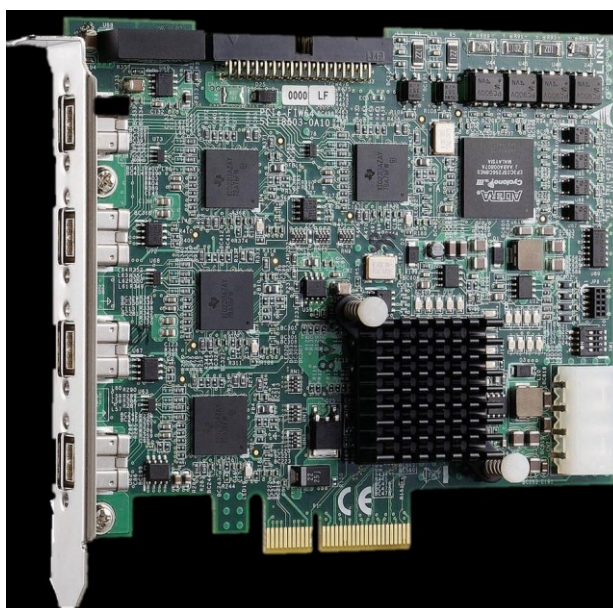
Obr. 1-31: Cognex GigE Network Interface Card

Název:	Intel PRO/1000 PT Dual Port Server Adapter
Výrobce:	Intel
Vstupní sběrnice:	Gigabit Ethernet
Výstupní sběrnice:	PCI Express
Datová propustnost:	2 x 1000 Mb/s (125MB/s)
I/O:	-
Napájení kamery:	prostřednictvím sběrnice Ethernet (PoE)
Příslušenství:	-
Cena:	3 721,- Kč [31]

Tab. 1-23: Technické parametry produktu Cognex GigE Network Interface Card

Adlink PCIe-FIW64

Taiwanská společnost Adlink patří mezi významné světové výrobce v oblastech aplikované informatiky, měření a automatizace. Její produkty nabízí také někteří výrobci průmyslových kamer (např. Allied Vision Technologies). V oblasti strojového vidění vyrábí karty pro zachytávání obrazu a PC vision systémy (více v kap. 0). Pro kamery s FireWire výstupem společnost nabízí kartu Adlink PCIe-FIW64, zobrazenou na Obr. 1-32. Technické údaje shrnuje Tab. 1-24: Technické parametry produktu Adlink PCIe-FIW64 [44]. Produkt je vybaven čtyřmi IEEE 1394b (FireWire 800) konektory a je navržen přímo pro úlohy vysokorychlostního strojového vidění. Z tohoto důvodu je hardware vybaven digitálními I/O a je uzpůsoben pro napájení kamer přímo po sběrnici FireWire. Pro méně náročné aplikace společnost Adlink nabízí také menší variantu PCIe-FIW62, která nedisponuje digitálními I/O a má pouze 2 FireWire výstupy. Výrobek je navíc vybaven dvěma LED diodami signalizujícími připojení ke kameře.



Obr. 1-32: Adlink PCIe-FIW64

Název:	PCIe-FIW64
Výrobce:	Adlink
Vstupní sběrnice:	IEEE 1394b (FireWire 800)
Výstupní sběrnice:	PCI Express
Datová propustnost:	3,2 Gbps (4 x 100 MB/s)
I/O:	4x optoizolovaný DI (0-25V), 4x optoizolovaný DO (3-24V), 4x optoizolovaný trigger vstup (0-25V), 4x optoizolovaný trigger výstup (0-5V)
Napájení kamery:	prostřednictvím sběrnice FireWire
Příslušenství:	kabeláž
Cena:	€ 353,80 (PCIe-FIW64); € 99,79 (PCIe-FIW62) [44]

Tab. 1-24: Technické parametry produktu Adlink PCIe-FIW64

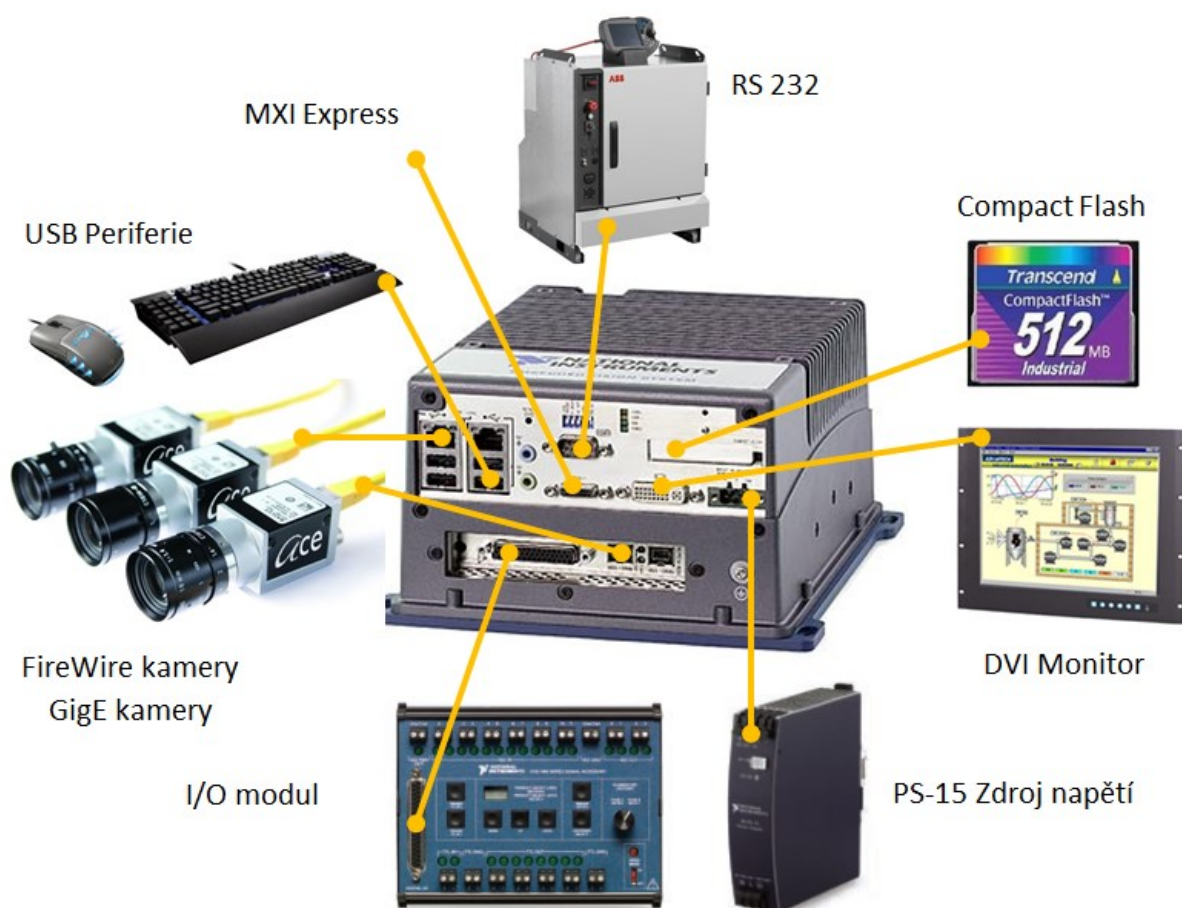
1.3.5 Vision systémy

Embedded vision systémy představují moderní trend řešení vyhodnocovacích jednotek strojového vidění. Je zde integrováno výkonné výpočetní jádro na bázi PC společně s veškerým hardware potřebným pro získání obrazu z kamery a interakci s okolím.

Většinou se jedná o robustně zpracované, kompaktní zařízení s pasivním chlazením určené k zabudování do elektrického rozvaděče výrobní linky. Na povrchu se nachází konektory pro připojení kamer (obvykle více druhů), výstupy na průmyslové sítě, externí monitor, rozšiřující I/O moduly a napájení.

Součástí dodávky je obvykle operační systém (nejčastěji Windows nebo operační systémy reálného času) a licence na software určený k vyhodnocování obrazu (více v kap. 1.3.6). V současné době je k dispozici široká nabídka embedded vision systémů s různou výkonností pro téměř všechny typy aplikací.

Na Obr. 1-33 se nachází embedded vision systém společnosti National Instruments, kde jsou hlavní části popsány. Kromě samotného vision systému jsou zde znázorněny i možné periferie pro aplikace na robotizovaných pracovištích.



Obr. 1-33: Embedded Vision Systém

NI EVS-1463RT

National Instruments patří mezi nejvýznamnější výrobce embedded vision systémů. EVS-1463RT, zobrazený na Obr. 1-34, má v sobě integrován dvoujádrový procesor Intel Core Duo pracující na frekvenci 1,66 GHz, což by mělo stačit pro řešení standardních úloh. Systém je vybaven konektorem Camera Link pro připojení 1 kamery v základní konfiguraci (255 MB/s) a dvěma ethernetovými konektory pro připojení GigE kamer nebo k napojení na nadřazený řídicí systém. Podporovány jsou různé sítě včetně EtherCAT nebo Modbus. K dispozici je množství optoizolovaných I/O, čítačové vstupy, MXI Express výstup a dostatek USB portů pro připojení periférií PC nebo externí paměti. Operační systém reálného času zaručuje úplnou kontrolu nad inspekčními procesy, pro jejichž tvorbu je s výrobkem dodáván softwarový balíček obsahující Vision Builder AI, NI Vision Acquisition Software a NI Vision Development Module. Technické údaje jsou shrnuty v Tab. 1-25 [41].



Obr. 1-34: NI EVS - 1463RT

Název:	EVS-1463RT
Výrobce:	National Instruments
Procesor:	Intel Core Duo 1,66 GHz
Operační paměť:	2 GB
Pevný disk:	1 GB SSD
I/O:	1xCamera Link (základní konfigurace), 2xRJ 45, 4x USB, 1x MXI Express, 2x audio jack, 1x RS-232, 1x DVI, 1x Compact Flash, 1x napájení, D-Sub 15-Pin (4x TTL DI/DO, 2x optoizolovaný DI, 2x RS-422)
Komunikace:	Modbus/TCP, RS-232, EtherCAT, Ethernet/IP, TCP/IP, Modbus
Operační systém:	Real-Time
Software:	Vision Acquisition Software , Vision Development Module Runtime , Vision Builder AI Runtime
Cena:	106 900,- Kč [41]

Tab. 1-25: Technické parametry produktu NI EVS-1463RT

Adlink EOS-1200

Model EOS-1200 je nejvýkonnější vision systém nabízený společností Adlink, který je určen pro aplikace vyžadující použití max. 4 GigE průmyslových kamer. Obsahuje vysoce výkonné výpočetní jádro tvořeno jedním z druhé generace procesorů Intel i5/i7 a může mít až 8GB operační paměti. Kompaktní aktivně chlazená skříň má na sobě umístěn dostatek dalších konektorů pro připojení dalších periférií a komunikaci s nadřazenými systémy. Vyšší odolnost proti selhání zabezpečí podpora RAID (ukládání dat na 2 nezávislé disky). Přístroj, zobrazený na Obr. 1-35, je dodáván bez operačního systému. Technické údaje produktu EOS-1200 obsahuje Tab. 1-26 [23]. Mezi nejčastější oblasti použití patří průmyslová automatizace, navádění robotů, analýza 3D obrazu a zpracování obrazu ve zdravotnictví.



Obr. 1-35: Adlink EOS-1200

Název:	EOS-1200
Výrobce:	Adlink
Procesor:	Intel Core i5/i7 Quad Core
Operační paměť:	až 8 GB
Pevný disk:	dle varianty (bez disku/ 320 GB HDD/32 GB SSD)
I/O:	4xRJ 45 (vybaveno PoE max. 32W), 2xRJ 45, 4x USB 2.0, 2x USB 3.0, 2x audio jack, 2x RS-232/422/485, 2x RS-232, 1x DVI-I, 1x CFast, 1x napájení, 16x optoizolovaný DI/DO
Komunikace:	neuveдена
Operační systém:	dodáváno bez OS; podpora Windows XP, XP Embedded, 7, Embedded Standard 7
Software:	dodáváno bez předinstalovaného software
Cena:	€ 1 749,24 [23]

Tab. 1-26: Technické parametry produktu Adlink EOS-1200

1.3.6 Software

Obraz z kamery je zpracováván v řídicím počítači pomocí specializovaného software. V dnešní době mají systémoví integrátoři široké možnosti výběru komerčně dostupného software spolupracujícím s většinou vyráběných kamer a periférií. V takovém prostředí se pak tvoří vlastní inspekční program. Pro jeho tvorbu jsou využity připravené nástroje využívající algoritmy pro zpracování obrazu. Jednotlivé druhy nástrojů a jejich obvyklé použití obsahuje Tab. 1-27 [2].

Nástroje	Funkce	Vstup	Výstupy	Parametry	Použití
filtry	zpracování hodnot jasu v jednotlivých bodech obrazu	ROI (poloha, tvar a velikost)	ROI	podle požadované funkce filtru	eliminace rušivých vlivů
nástroje pracující s hranami	nalezení jednotlivých hran		aproximace hrany geometrickým útvarem, jeho poloha a vlastnosti	způsob hledání hran	rozpoznání, nalezení polohy a počítání
	nalezení útvarů složených z hran na základě podobnosti		poloha nalezeného útvaru a míra shody	vzorový útvar	rozpoznání, nalezení polohy a počítání
nástroje pracující s rozložením jasu	nalezení odlišných útvarů (blob)		poloha nalezeného blobu a jeho vlastnosti	předpokládané vlastnosti blobu (velikost, jas atd.)	nalezení povrchových vad
	nalezení motivu na základě podobnosti		poloha nalezeného motivu a míra shody	vzorový motiv	rozpoznání, nalezení polohy a počítání
	vyhodnocení jasu a kontrastu v ROI		statistické parametry rozložení jasu, histogram	způsob vyhodnocení	rozpoznání, nalezení vad

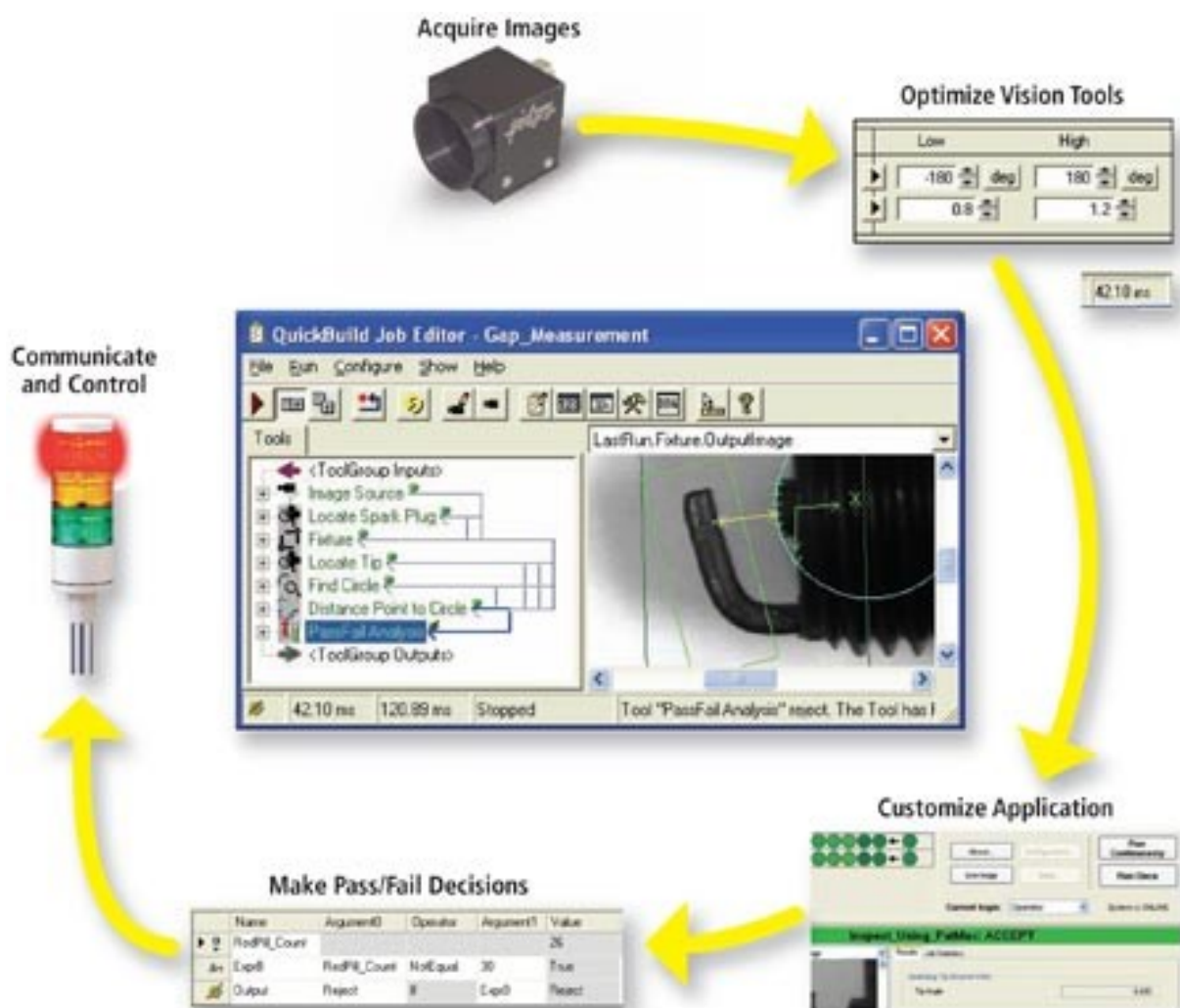
Tab. 1-27: Druhy a použití nástrojů pro práci s obrazem

Výše zmíněná prostředí a postupy tvorby jsou optimalizovány pro naprostou většinu běžných inspekčních úloh. Pro vysoce speciální zákaznické systémy zpracování obrazu, vyžadující např. mimořádně vysokou rychlost vyhodnocení, je nutno vyrobit software přímo pro danou úlohu, který musí obsahovat pouze nejnútnejší nástroje a být optimalizovaný pro použitý hardware. Vývoj mohou např. usnadnit komerčně dostupné knihovny algoritmů pro zpracování obrazu.

Běžná vývojová prostředí určená pro obrazovou analýzu a tvorbu inspekčních programů se běžně nacházejí v nabídkách předních výrobců kamer a dalších komponent strojového vidění. Na následujících stranách jsou k dispozici stručné popisy některých produktů.

Cognex VisionPro

VisionPro je softwarové prostředí spolupracující nejen s hardware firmy Cognex, ale také s produkty ostatních výrobců. Výhodou nabízeného software je zázemí světového lídra trhu (americké firmy Cognex) a široká komunita uživatelů (přes 700 000 instalací [18]). Firma nabízí různé licence obsahující nástroje pro konkrétní aplikace. Pro paletizaci a kontrolu sestav existuje rovněž varianta VisionPro 3D vyhodnocující údaje z 3D kamery, popřípadě skupiny 2D kamer a poskytuje údaje o prostorové poloze a orientaci. Uživatelské prostředí je rozloženo do několika oken. Na Obr. 1-36 je znázorněn přibližný průběh tvorby inspekčního programu v softwarovém prostředí firmy Cognex. V horní části je znázorněno pořízení snímků kamerou („Acquire Images“), následuje optimalizace kritérií jednotlivých nástrojů („Optimize Vision Tools“). Proces pokračuje ověřením a případnou úpravou aplikace („Customize Application“), tvorbou logických rozhodnutí („Make Pass/Fail Decisions“) a končí návazností na periferie a řídicí systém „Communicate and Control“. Uprostřed je okno „Job Editor“ kde je možno vidět na levé straně strom použitých nástrojů a na pravé straně výsledný snímek doplněný o vizualizaci dílčích analýz.

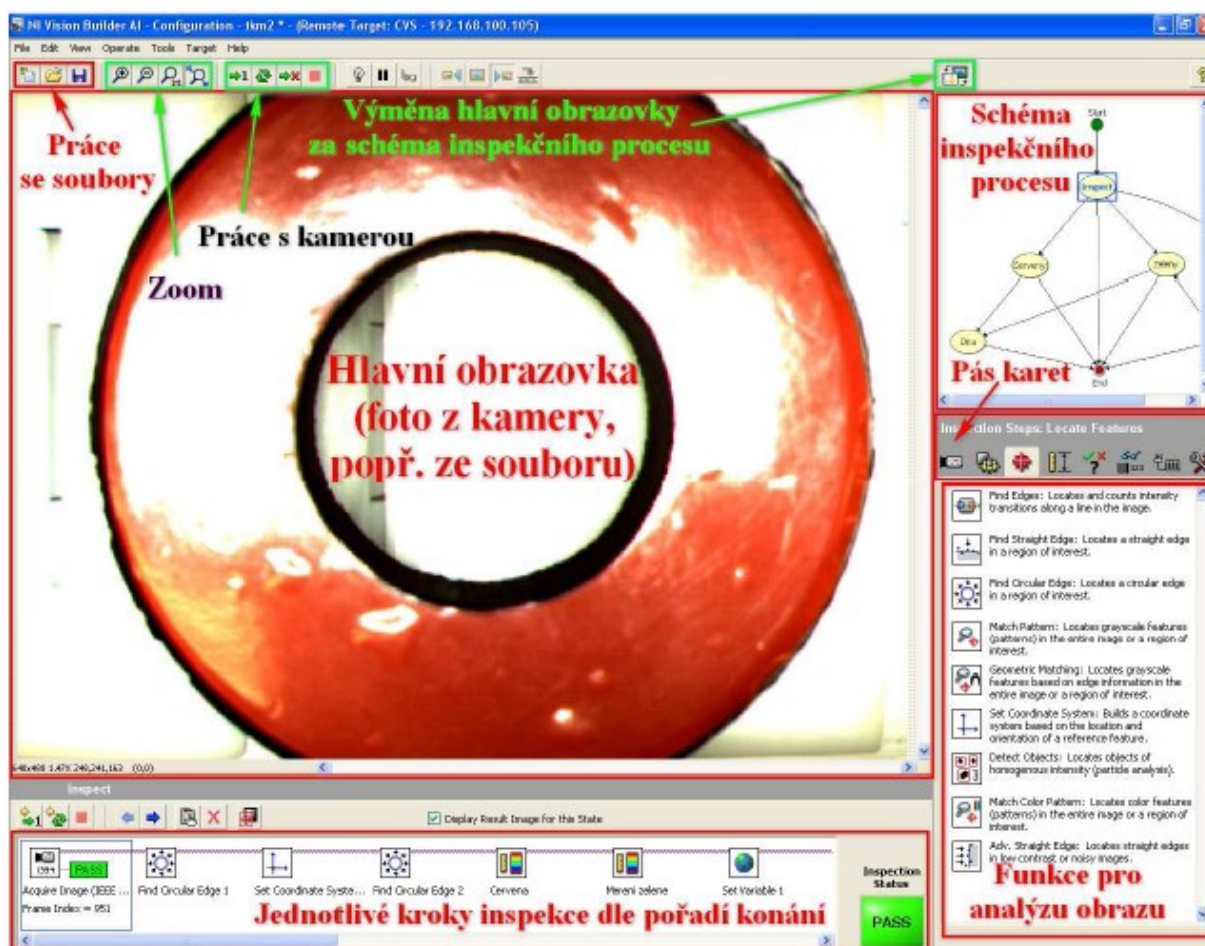


Obr. 1-36: Cognex VisionPro[62]

NI Vision Builder for Automated Inspection

Softwarové prostředí nabízející obdobné funkce jako Cognex VisionPro. Podporována je většina současně vyráběných průmyslových kamer a hardware vyráběný National Instruments.

Inspekce je možno tvořit online, popř. offline za využití předem vytvořených modelových snímků. Naprostá většina tvorby inspekce probíhá ve dvou přehledných oknech. Na Obr. 1-37 je vidět okno tvorby inspekce zobrazující hlavní snímek, pořadí použitých nástrojů včetně zobrazení výsledků daného kroku, seznam možných nástrojů a schéma inspekčního procesu. Po vytvoření inspekčního procesu se otevře inspekční okno, kde se spustí inspekční proces, během kterého se shromažďují statistiky výsledků a vytížení systému. Během inspekce se také vypisují výsledky jednotlivých kroků společně s naměřenými hodnotami.



Obr. 1-37: NI Vision Builder for Automated Inspection

1.4 Osvětlení

Kvalita a způsob osvětlení snímané scény (Region of Interest, dále jen ROI) vysoce ovlivňuje spolehlivost systému strojového vidění. Je nezbytné vycházet z konkrétní úlohy a situace na pracovišti. Podle zjištěných podmínek se navrhne konkrétní způsob a typ osvětlení, jeho druh a intenzita. Podle potřeby se eventuálně zajistí napojení systému osvětlení na signál spouště kamery („trigger“).

1.4.1 Typy vyzařovaného světla

Pro konstrukci osvětlovačů se v systémech strojového vidění využívá technologie LED, jež vyniká úsporností, konstantními optickými vlastnostmi, snadným zapojením, nízkou hmotností a malými konstrukčními rozměry. LED diody ovlivňují zejména svítivost, spektrální charakteristiku a směrovou vyzařovací charakteristiku světelného zdroje.

Dle spektrální charakteristiky (rozložení světla na jednotlivé vlnové délky) lze zdroje rozdělit na:

- zdroje monochromatického světla
- zdroje bílého světla
- zdroje infračerveného světla

Zdroje monochromatického světla

Nasvětlení scény monochromatickým světlem se používá pro zvýšení nebo snížení kontrastu barevných objektů. V případě zvýšení kontrastu je zapotřebí nasvětlit scénu komplementární barvou analyzovaného objektu (červený objekt bude tedy optimálně nasvítit zeleným světlem apod.). Pro snížení kontrastu je vhodné scénu nasvítit barvou analyzovaného objektu.

Zdroje monochromatického světla také nachází uplatnění v kombinaci s monochromatickými snímači průmyslových kamer, které jsou obvykle citlivé na červené spektrum (okolo 625 nm). Z tohoto důvodu jsou zdroje červeného světla nejčastěji používanými monochromatickými zdroji a nachází se v produktových nabídkách většiny výrobců.

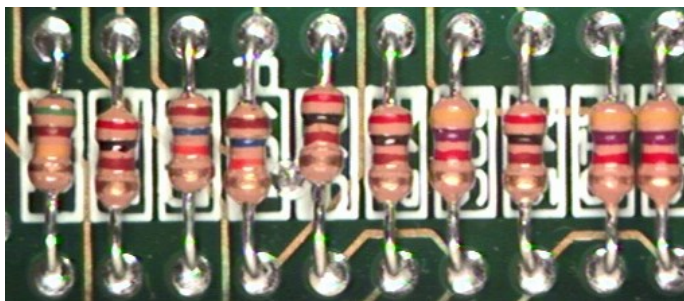
Na Obr. 1-38 je vidět rozdíl mezi snímanou scénou nasvícenou bílým a červeným světlem.



Obr. 1-38: Rozdíly mezi jednotlivými typy světla[34]

Zdroje bílého světla

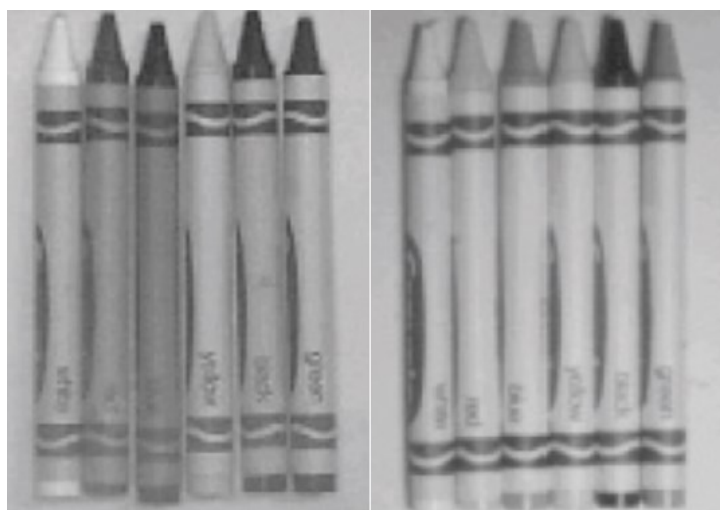
Bílé světlo vzniká složením všech barev spektra. V systémech strojového vidění je použito zejména pro nasvětlení scén, kde bude prováděna analýza barev. Charakteristikou bílého světla je dále jeho barevná teplota, která je uváděna jako parametr v datových listech jednotlivých produktů. Obvykle se vyrábějí osvětlovače vyzařující bílé světlo o teplotě 5 000K – 8 500K. Nasvětlení bílým světlem je demonstrováno na Obr. 1-39.



Obr. 1-39: Nasvětlení bílým světlem [51]

Zdroje infračerveného světla

Infračervené spektrum se nalézá nad hranicí viditelného světla a není proto detekovatelné lidským zrakem. Vlnová délka generovaného světla je obvykle okolo 850 nm. V úlohách strojového vidění je infračervené záření použito pro nasvětlení lesklých kovových předmětů (eliminace nežádoucích odlesků) nebo pro odstraňování barevného kontrastu na černobílých snímcích, což zapříčiňuje barevnou uniformitu, viditelnou na Obr. 1-40.



**Nasvětlení bílým
světlem**

**Nasvětlení
infračerveným světlem**

Obr. 1-40: Nasvětlení bílým a infračerveným světlem [22]

Světelné zdroje se dle směrové vyzařovací charakteristiky lze rozdělit:

- zdroje směrovaného (tvrdého) světla
- zdroje rozptýleného (měkkého) světla

Zdroje směrovaného světla

Směrované světlo je charakteristické velmi nízkým rozptylem světelných paprsků vycházejících z jeho zdroje. V ideálním případě jsou paprsky téměř rovnoběžné. Směrované světlo je tvrdé, vytváří ostré kontrasty a stíny. Pokud jsou světelné paprsky rovnoběžné s osou objektivu, dochází k vytváření odlesků na mírně lesklých a lesklých plochách.

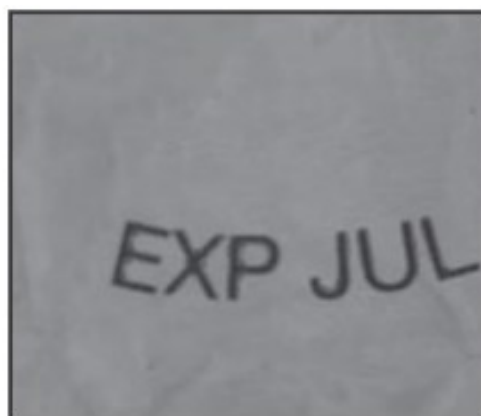
Zdroje rozptýleného světla

V případě rozptýleného světla má jeho zdroj větší vyzařovací úhel. Výsledkem je rovnoměrnější osvětlení povrchu včetně drážek, záhybů apod. Rozptýlené světlo je měkké a téměř nevytváří stíny. Snižuje se tak celkový kontrast scény a dochází k eliminaci odlesků. Zdroje rozptýleného světla využívají LED diody s vysokým vyzařovacím úhlem, často ještě v kombinaci s difuzorem nebo zrcadlem.

Na Obr. 1-41 je vidět rozdíl mezi směrovaným (tvrdým) světlem a rozptýleným (měkkým) světlem při ověřování nápisu na lesklé kovové fólii. Stíny vytvořené směrovaným světlem prakticky znemožňují nalezení a přečtení zobrazeného textu. Proto je vhodné pro tento případ použít světlo maximálně rozptýlené.



**Nasvětlení tvrdým
světlem**



**Nasvětlení měkkým
světlem**

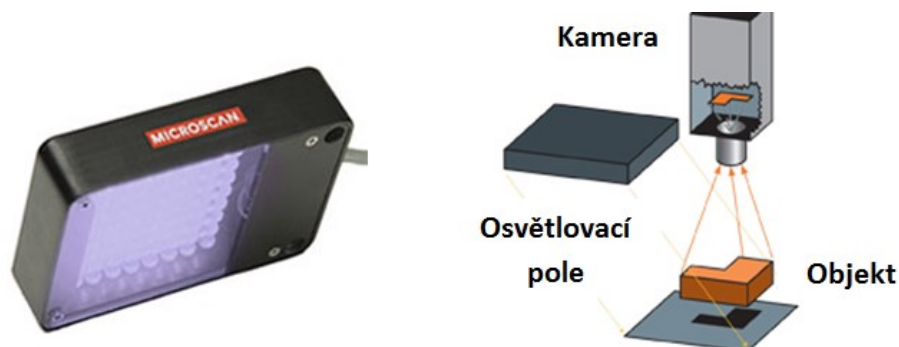
Obr. 1-41: Rozdíl mezi nasvětlení tvrdým a měkkým světlem [22]

1.4.2 Typy osvětlení

Současná nabídka osvětlovačů se skládá z několika konstrukčních řešení, vyráběných v různých velikostech tak, aby pokryly potřeby většiny aplikací strojového vidění. Osvětlovače se skládají z vysoce výkonných LED diod umístěných v odolném plastovém, popř. kovovém těle. V případě potřeby před LED diody umístěn difuzor zvyšující rozptyl světelných paprsků nebo zrcadlo. Na následujících stranách je obsažen krátký popis jednotlivých konstrukčních variant a typických aplikací.

Osvětlovací pole

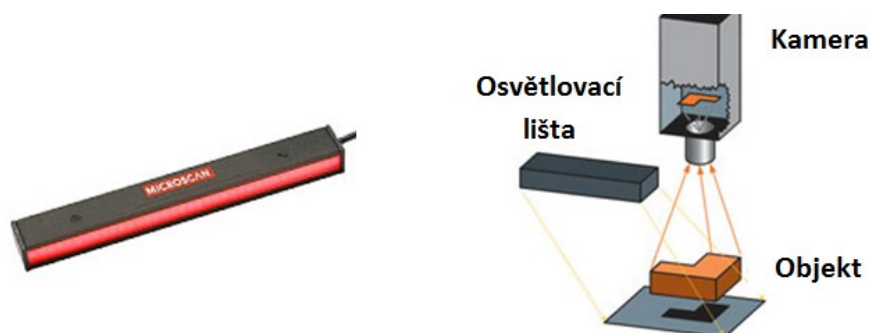
Osvětlovací pole jsou tvořena množinou LED diod uspořádaných obvykle do obdélníku a jsou určeny pro nasvětlení větších ploch. Ve většině případů se jedná o zdroje směrovaného světla. Tento způsob nasvětlení se používá nejčastěji při inspekcích etiket a plochých matných povrchů. Na Obr. 1-42 je znázorněn LED panel firmy Microscan společně s demonstrací jeho použití.



Obr. 1-42: LED panel [48]

Osvětlovací lišty

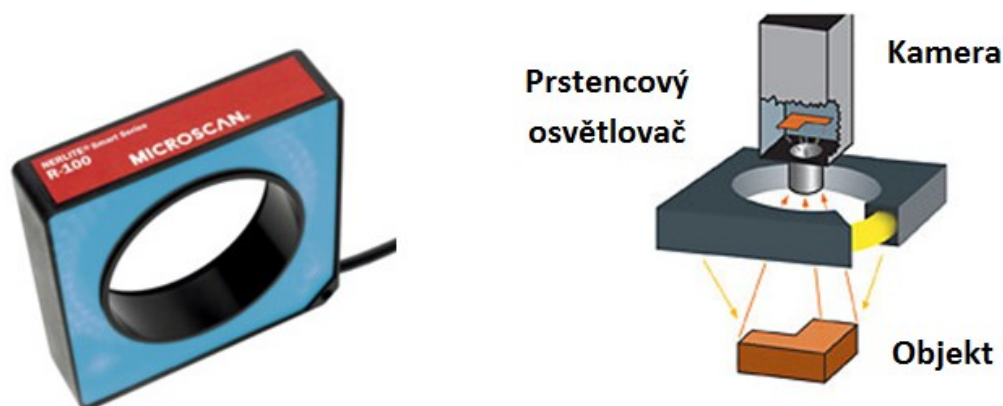
Osvětlovací lišty tvoří LED pásek, na němž jsou v pravidelných intervalech umístěny výkonové LED diody. Podobně jako osvětlovací pole jsou také osvětlovací lišty nejčastěji zdrojem směrovaného světla. Osvětlovací lišty se nejčastěji používají při inspekcích matných předmětů menších rozměrů. Obr. 1-43 znázorňuje osvětlovací lištu firmy Microscan společně s ukázkou typické aplikace.



Obr. 1-43: Osvětlovací lišta [48]

Prstencové osvětlovače

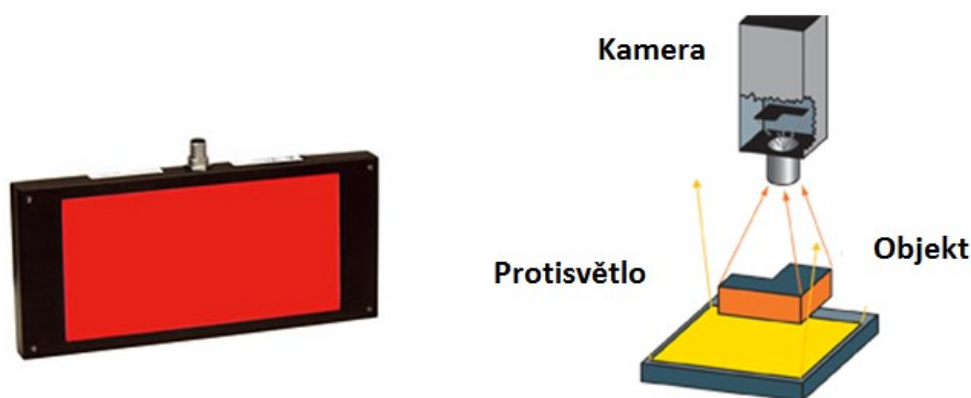
Prstencové osvětlovače tvoří LED diody uspořádané do tvaru mezikruží, v jehož středu se nalézá objektiv kamery. Obvykle jde o zdroje směřovaného světla s možností nasazení difuzoru. Použití prstencových osvětlovačů je nízkonákladové řešení vhodné pro jednoduché aplikace, kterým nevadí čelní osvětlení, jako např. kontrola potisku matných povrchů nebo kruhových objektů. Na Obr. 1-44 je vidět osvětlovač Microscan a jeho umístění v jednotce strojového vidění.



Obr. 1-44: Prstencový osvětlovač [48]

Protisvětla

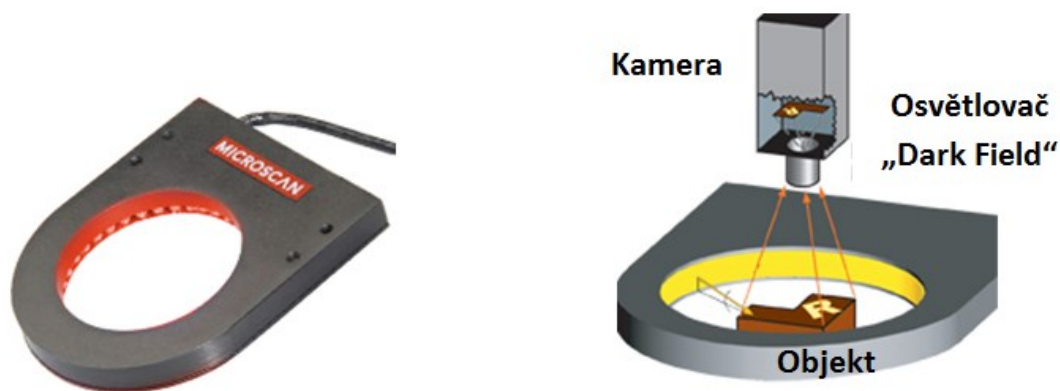
Osvětlovače „Backlight“, tedy protisvětla, jsou osvětlovací pole s difuzorem určená k umístění naproti kamery. Měřený objekt se nalézá mezi kamerou a osvětlením. Výsledný obraz je vysoce kontrastní a znázorňuje pouze obrysy objektu. Protisvětla se používají při kontrolách rozměrů a znázornění součástí v průhledném pouzdře (např. žárovky, pojistky, apod.). Osvětlovač „Backlight“ firmy Microscan, společně se znázorněním jeho použití, je na Obr. 1-45.



Obr. 1-45: Protisvětlo [48]

Osvětlovače „Dark-Field“

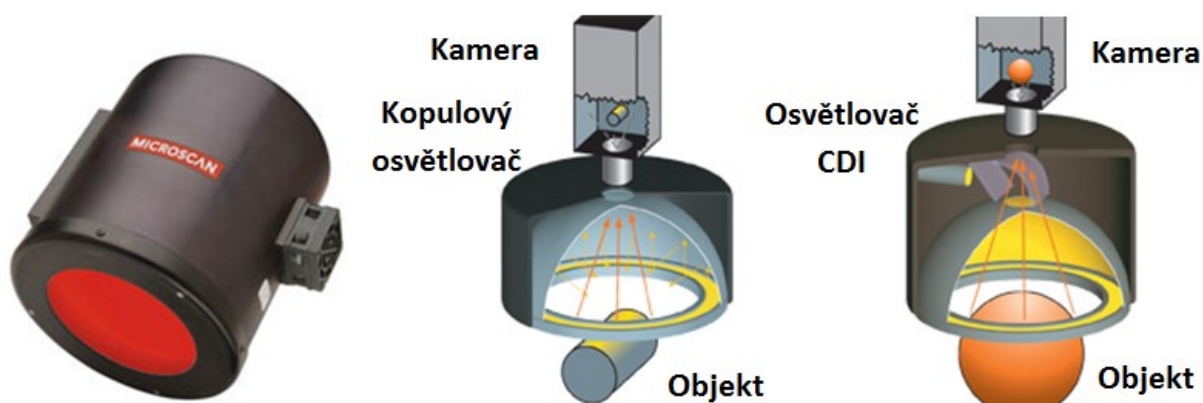
„Dark-Field“ osvětlovače tvoří prstenec LED diod s úzkým vyzařovacím spektrem. Jedná se proto o zdroje směřovaného světla. Umisťují se těsně nad analyzované objekty, které nasvěčují pod velmi malým úhlem. Charakteristické použití osvětlovačů „Dark-Field“ je při analýzách gravírovaných a laserem vypalovaných nápisů, povrchových vad a výstupků. Na Obr. 1-46 se nalézá osvětlovač „Dark-Field“ firmy Microscan společně s ilustrací prostorového uspořádání systému strojového vidění pro řečené aplikace.



Obr. 1-46: Osvětlovač "Dark-Field" [48]

Kopulové a CDI osvětlovače

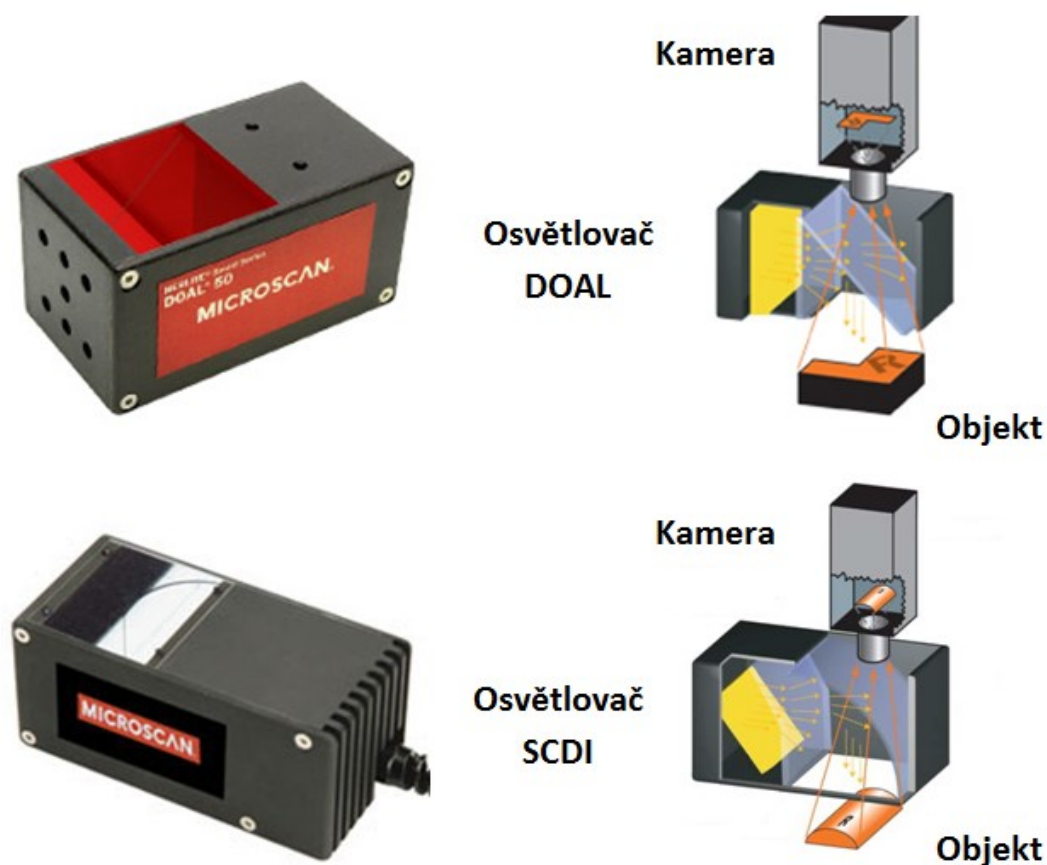
V případě, že je nutno použít vysoce rozptýlené světlo, samotné použití difuzoru nedostačuje. Pro dokonalý výsledek jsou kopulové a CDI osvětlovače vybaveny rozptylovacím zrcadlem. Zdroj světla v podobě prstence LED diod zespolu osvětluje kopulovité zrcadlo odrážející paprsky rovnoměrně na analyzovanou plochu. V horní části zrcadla je otvor pro přiložení kamery. Podobně jako v případě prstencových osvětlovačů, je střed díky otvoru nasvícen méně než jeho okolí. Proto jsou osvětlovače CDI navíc vybaveny dalším zdrojem světla umístěným nad otvorem v kopuli osvětlujícím přes difuzor polopropustné zrcadlo, jež paprsky odrazí na analyzovaný objekt. Konstrukce obou typů osvětlovačů, společně s CDI osvětlovačem firmy Microscan, je na Obr. 1-47. Osvětlovače se používají při inspekcích lesklých tvarovaných površích.



Obr. 1-47: Kopulové a CDI osvětlovače [48]

DOAL a SCDI osvětlovače

DOAL a SCDI osvětlovače jsou zdroje vysoce rozptýleného světla využívající difuzor v kombinaci s rozptylovými polopropustnými zrcadly. Zdroj světelného záření představuje LED pole, které je umístěno u osvětlovačů DOAL kolmo k povrchu analyzovaného objektu, zatímco u osvětlovačů SCDI s tímto povrchem svírá cca 135° . Paprsky procházejí přes difuzor na polopropustné zrcadlo umístěné pod úhlem 45° mezi kamerou a objektem. Zde se odrazí a rovnoměrně dopadají na analyzovaný objekt. Paprsky odražené od předmětu prochází polopropustným zrcadlem do objektivu kamery. DOAL osvětlovače se používají při úlohách vyžadujících osvětlení lesklých, často kovových ploch. SCDI osvětlovače se používají pro nasvícení lesklých válcových ploch. Osvětlovače DOAL a SCDI firmy Microscan jsou na Obr. 1-48 společně se znázorněním jejich konstrukce.



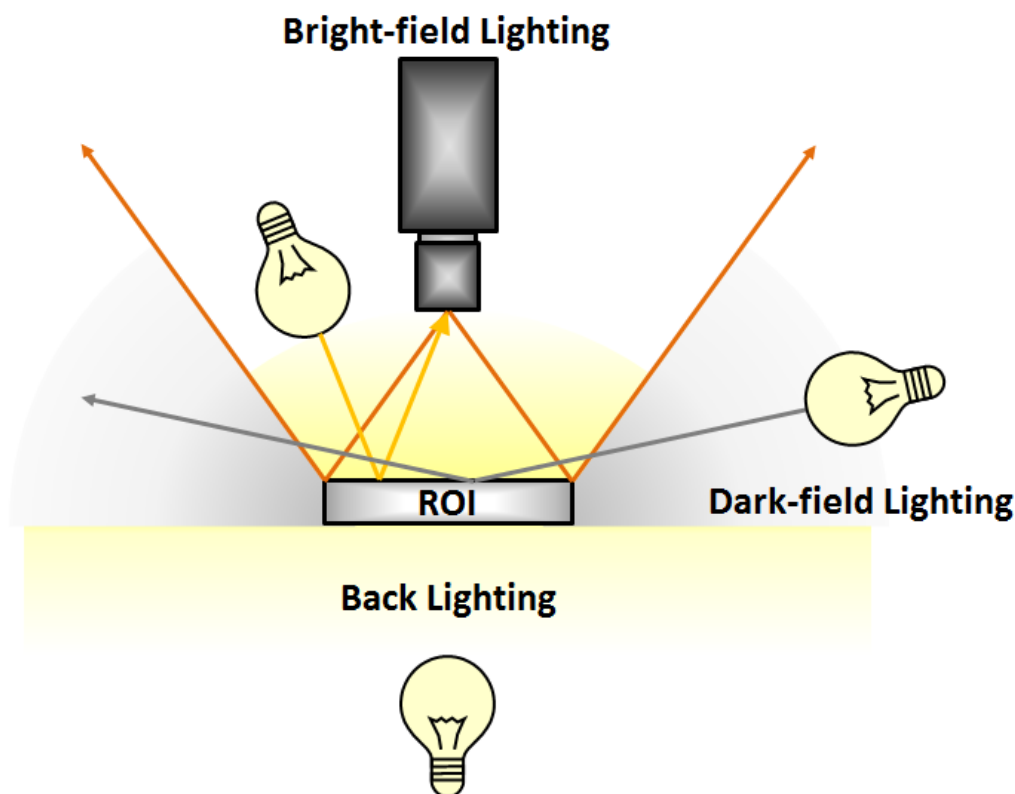
Obr. 1-48: Osvětlovače DOAL a SCDI [48]

1.4.3 Způsoby osvětlení

Ve strojovém vidění je pro základní způsoby osvětlení použito názvosloví převzaté z oboru klasické fotografie [3]:

- přední osvětlení s jasným zorným polem („Bright-field Lighting“)
- přední osvětlení s temným zorným polem („Dark-field Lighting“)
- zadní osvětlení („Back Lighting“)

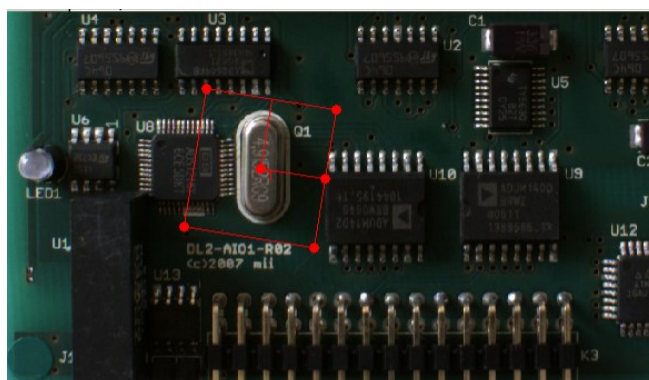
Pro názornost jsou jednotlivé způsoby osvětlení znázorněny na Obr. 1-49.



Obr. 1-49: Způsoby osvětlení objektu [3]

Přední osvětlení s jasným zorným polem

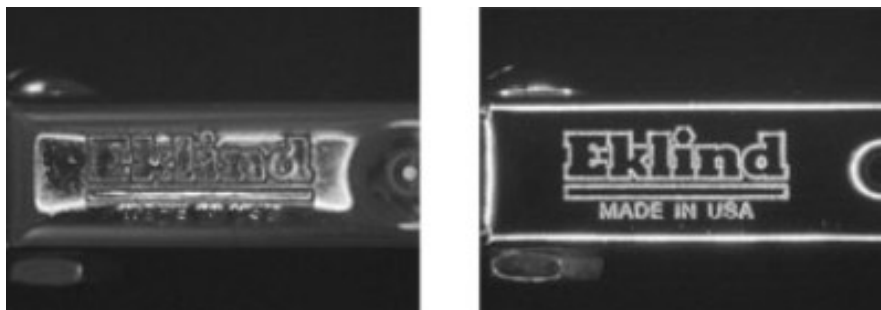
Přední osvětlení s jasným zorným polem je nejběžnější způsob osvětlení. Zdroj světla vysílá rozptýlené paprsky na snímáný objekt, od kterého se následně odráží a přes optickou soustavu kamery dopadá na snímač. Výsledný snímek by se měl ve většině případů co nejvíce podobat reálnému obrazu. Pro nasvícení objektu touto metodou je možno použít klasické prstencové osvětlovače nebo různé zdroje rozptýleného světla. Ukázka snímku nasvíceného osvětlením s jasným zorným polem je na Obr. 1-50.



Obr. 1-50: Přední osvětlení s jasným zorným polem [40]

Přední osvětlení s temným zorným polem

Další metodou osvětlení je přední osvětlení s temným zorným polem (známé také jako „Dark-field lighting“). Paprsky světla svírají velmi malý úhel se snímanou rovinou, a proto se neodrážejí do objektivu, ale pokračují dále do prostoru. Světlo prochází kamerou pouze tehdy, je-li odraženo od nějaké nerovnosti. Těmito vlastnostmi je metoda předurčena pro použití se systémy detekce povrchových vad, ale také se výborně hodí pro identifikaci gravírovaných nápisů a symbolů, jak je vidět na Obr. 1-51 (vlevo nasvícení osvětlením s jasným zorným polem, vpravo metodou „Dark-field“).



Obr. 1-51: Přední osvětlení s temným zorným polem [3]

Zadní osvětlení

Poslední tradiční metodou nasvícení objektů ve strojovém vidění je zadní osvětlení. Osvětlovače, standardně větší zdroje rozptýleného světla, jsou umístěny přímo naproti kameře a svítí přímo do objektivu. V případě přítomnosti objektů je tak možno rozeznat obrysy nebo kontrolovat prvky uvnitř průhledných obalů (např. vlákno žárovky). Příklad snímku pořízeného v protisvětle je na Obr. 1-52.



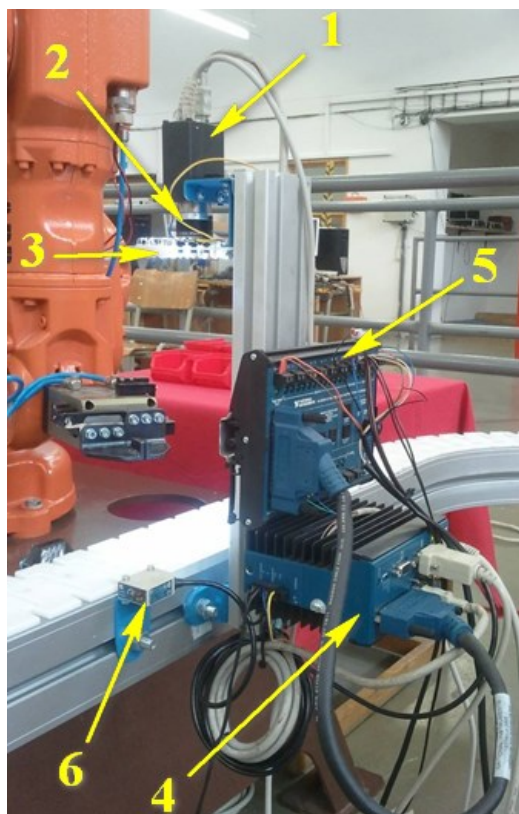
Obr. 1-52: Zadní osvětlení [43]

2 Aktuálně dostupné systémy strojového vidění na katedře robototechniky

V současné době disponuje katedra robototechniky dvěma systémy strojového vidění, jež jsou součástí pracovišť ABB IRB 140 a ABB IRB 360. Bližší informace o jednotlivých prvcích systému jsou shrnuty v následujících odstavcích.

2.1 Pracoviště ABB IRB 140

Systém strojového vidění na pracovišti ABB IRB 140, zobrazený na Obr. 2-1, se skládá z průmyslové kamery Basler, objektivu Fujinon, kompaktního vision systému (CVS) National Instruments NI 1454 a dalších prvků popsanych v Tab. 2-1.



Obr. 2-1: Systém strojového vidění na pracovišti ABB IRB 140

Odkaz:	Objekt:	Název:
1	Kamera	Basler A601 fc
2	Objektiv	Fujinon HF16HA-1B
3	Osvětlení	Prstencové osvětlení realizované Ing. Kamilem Byrtusem [1]
4	CVS	National Instruments NI 1454
5	I/O modul	NI Vision I/O Terminal Block (obj. č. 779166-01)
6	Optická závora	Telemecanique XUM-LH0451
-	PC	PC pro programování CVS
-	Software	NI Vision Builder for Automated Inspection

Tab. 2-1: Popis prvků systému strojového vidění na pracovišti ABB IRB 140

2.1.1 Basler A601 fc

Průmyslová kamera Basler A601 fc, zobrazená na Obr. 2-2, je vybavena barevným 1/2 palcovým snímačem a je schopna zaznamenat až 60 snímků/s. Komunikace s CVS probíhá pomocí sběrnice IEEE 1394. Technické parametry shrnuje Tab. 2-2 [13].



Obr. 2-2: Basler A601 fc

Název:	A601 fc
Výrobce:	Basler
Obrazový snímač:	CMOS 1/2" barevný
Typ závitů objektivu:	C
Formát videosignálu:	Mono 8, Raw 8, Raw 16, YUV 4:2:2
I/O:	I: 4 x digitální vstup (1x trigger) O: 4 x digitální výstup (1x trigger ready)
Komunikace:	IEEE 1394 (po sběrnici také napájeno)
Výkonnost:	60 snímků/s
Max. rozlišení:	656 x 490
Rozměry:	73,3 x 44 x 29 mm (dle varianty)
Teplota okolí:	0 –50°C
Cenová hladina:	cca 20 000,- Kč [13]

Tab. 2-2: Technické parametry produktu Basler A601fc

2.1.2 Fujinon HF16HA-1B

Objektiv HF16HA-1B je určen pro kamery s rozlišením až 1,5 Mpix. Mezi přednosti produktu, zobrazeného na Obr. 2-3, patří vysoká světelnost, odolná konstrukce a kvalitní optická soustava s malou deformací obrazu. Technické parametry jsou uvedeny v Tab. 2-3.



Obr. 2-3: Fujinon HF16HA-1B

Název:	HF16HA-1B
Výrobce:	Fujifilm
Rozměry:	29,5 x 29,5 mm
Ohnisková vzdálenost:	16 mm
Rozsah clony:	F1,4 - 16
Velikost snímáče:	2/3"
Závit objektivu:	C
Nastavení clony:	ruční
Zaostřování:	ruční
Min. vzdálenost objektu:	100 mm
Cena:	cca 2500,- Kč [27]

Tab. 2-3: Technické parametry produktu Fujinon HF16HA-1B

2.1.3 Prstencové osvětlení

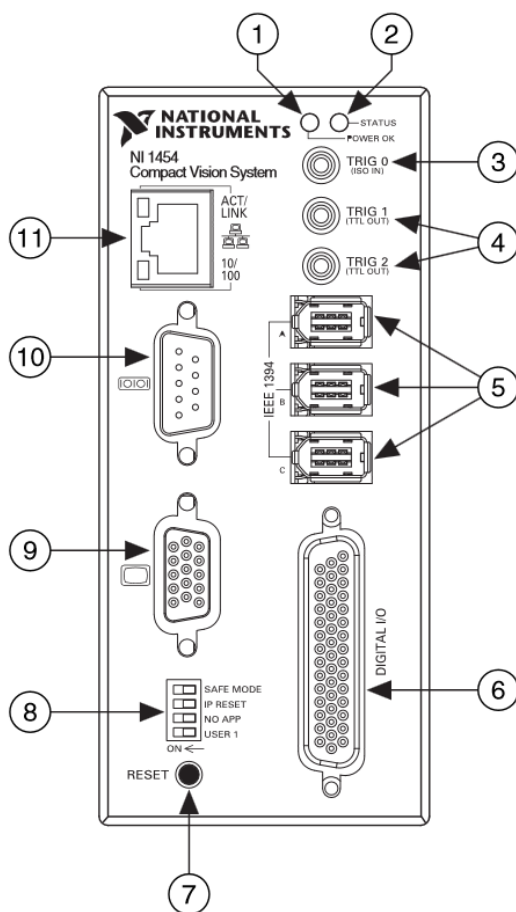
Prstencový osvětlovač byl realizován Ing. Kamilem Byrtusem v rámci jeho diplomové práce [1]. Osvětlení, zobrazené na Obr. 2-4, sloužilo k nasvětlení tmavých spojovacích materiálů na světlém podkladu dopravníku.



Obr. 2-4: Prstencový osvětlovač

2.1.4 National Instruments NI 1454

Kompaktní Vision systém NI 1454 je ekonomický vision systém, jehož základem je pasivně chlazený jednojádrový procesor Intel Celeron pracující na frekvenci 400 MHz, jenž má k dispozici 128 MB SDRAM. Systém, znázorněný na Obr. 2-5 s popisem jednotlivých částí v Tab. 2-4 [43], umožňuje připojení až 3 kamer prostřednictvím sběrnice IEEE 1394, externího monitoru, PC a dalších periférií.



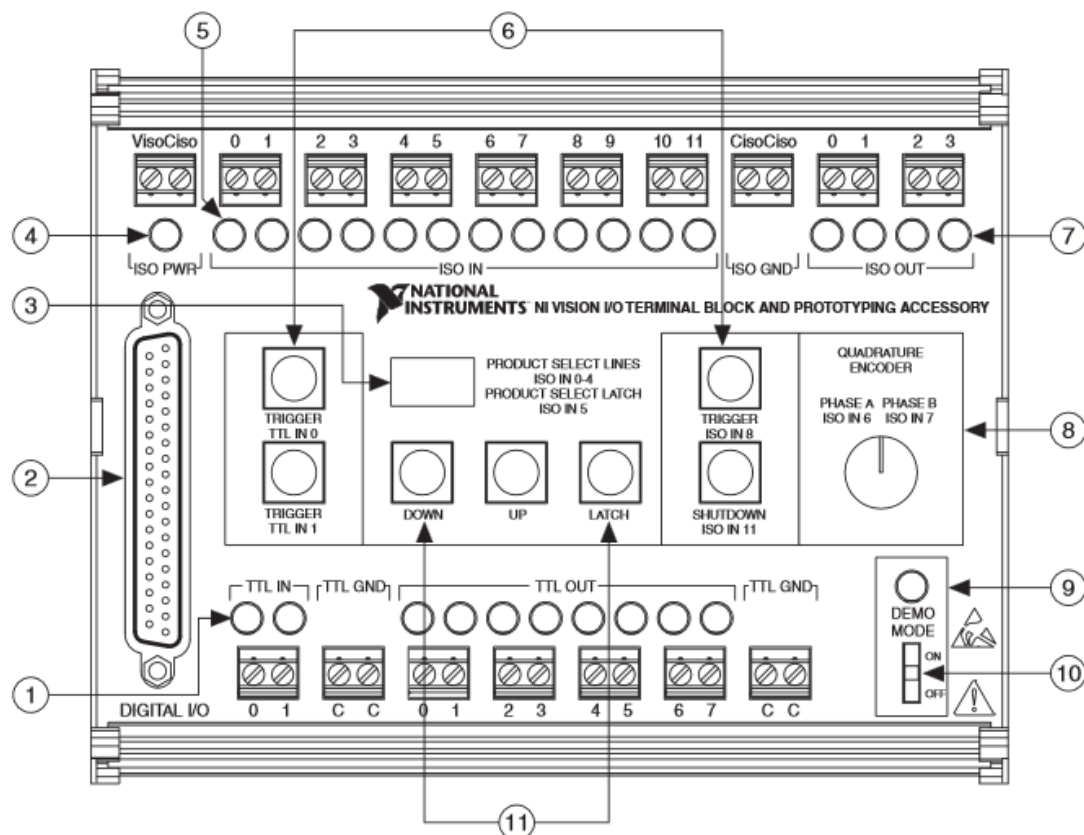
Obr. 2-5: NI 1454

Odkaz:	Název:
1	LED napájení
2	LED stavu CVS
3	Optoizolovaný DI
4	TTL DO
5	3x IEEE 1394a
6	37 pinový D-Sub konektor
7	RESET tlačítko
8	DIP přepínače
9	VGA (připojení externího monitoru)
10	Konektor RS-232
11	RJ-45 EtherNetový konektor

Tab. 2-4: Popis jednotky strojového vidění NI 1454

2.1.5 NI Vision I/O Terminal Block

NI Vision I/O Terminal Block je rozšiřující karta vstupů a výstupů kompaktního systému strojového vidění NI 1454. S CVS je spojen 37 pinovým konektorem typu D-Sub. Na desce se nalézají svorkovnice, kde se mohou připojit vstupy a výstupy a napájení. Pro účely testování aplikace je na desce několik tlačítek a potenciometrů, pomocí nichž lze generovat testovací signály na definované vstupy. Na Obr. 2-6 je znázorněn I/O modul s odkazy uspořádanými v Tab. 2-5 [43].



Obr. 2-6: NI Vision I/O Terminal Block

Odkaz:	Název:
1	Indikační LED TTL I/O
2	37 pinový D-Sub konektor
3	LED displej
4	LED indikující napájení
5	LED indikující stav optoizolovaných vstupů
6	Tlačítka pro generování pulsů
7	LED indikující stav optoizolovaných výstupů
8	Potenciometr pro testování vstupů pro enkodér
9	LED indikující demo režim
10	DIP přepínač režimů
11	Ovládací tlačítka

Tab. 2-5: Popis deský NI Vision I/O Terminal Block

2.1.6 Telemechanique XUM-LH0451

XUM-LH0451 je miniaturní ekonomická optická závora se snadným zapojením. Vysílač i přijímač je umístěn v 1 šasi, a proto musí být systém doplněn ještě o reflexní plochu. Produkt je zobrazen na Obr. 2-7 a jeho technické specifikace jsou uvedeny v Tab. 2-6 [64].



Obr. 2-7: Telemechanique XUM-LH0451

Název:	XUM-LH0451
Výrobce:	Telemechanique
Dosah:	4 m
Typ výstupu:	PNP
Napájení:	10 – 30 V DC/ 100 mA

Tab. 2-6: Technické parametry produktu Telemechanique XUM-LH0451

2.1.7 PC pro programování CVS

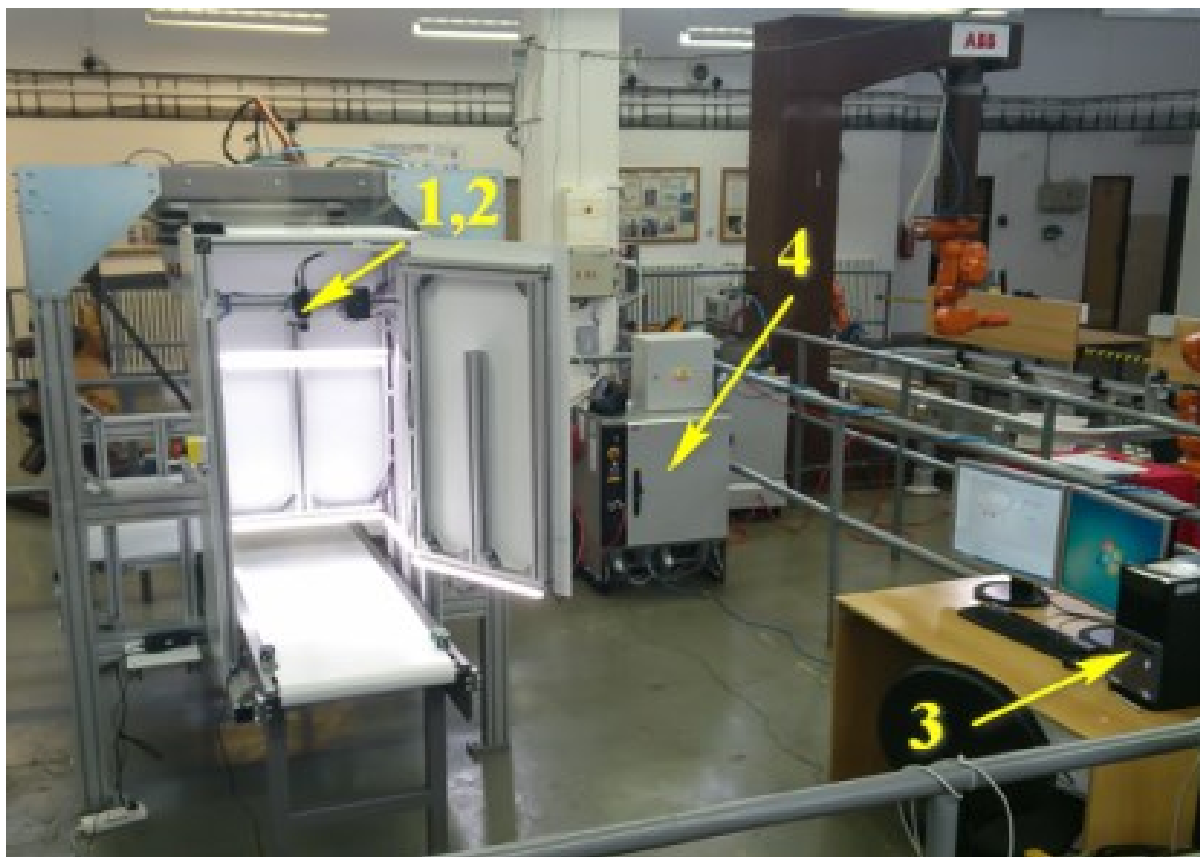
Pro účely programování vision systému je použito kancelářské PC dostupné v době realizace na pracovišti. PC s CVS komunikuje prostřednictvím EtherNetu. Hardwarovou vybavenost počítače shrnuje Tab. 2-7.

Procesor:	Intel Pentium 4, 3 GHz
RAM:	512 MB
Grafická karta:	Nvidia G-Force FX 5700
Síťová karta:	Marvell Yukon 88E8001/8003/8010 PCI GigE Controller
HDD:	80 GB Western Digital WD800JB-00JJA0
Operační systém:	Windows XP Professional, Service Pack 2, 32-bit

Tab. 2-7: Technické parametry PC pro programování CVS

2.2 Pracoviště ABB IRB 360

Pracoviště s robotem ABB IRB 360 bylo katedrou pořízeno v roce 2012 pro účely demonstrace a výuky studentů. Samotný robot se vyznačuje paralelní kinematickou strukturou typu delta a pohonnými jednotkami umístěnými v základně. Díky této koncepci se jedná o jeden z nejrychlejších manipulačních robotů na současném trhu. Robotizované pracoviště je dále vybaveno dopravníkem s enkodérem, systémem strojového vidění a řídicím PC. Bližší informace o robotu a pracovišti uvádí ve své diplomové práci Bc. Jakub Mžík [4]. Prvky systému strojového vidění jsou na Obr. 2-8 a v Tab. 2-8. Pracoviště bylo, oproti stavu na obrázku, dodáno bez kamerového boxu a systému osvětlení.



Obr. 2-8: Pracoviště ABB IRB 360

Odkaz:	Objekt:	Název:
1	Kamera	Basler scA1300- 32gc
2	Objektiv	Fujion HF9HA-1B
3	Řídicí PC	Řídicí PC (také PC pro zpracování obrazu)
4	Kontrolér	Řídicí jednotka robotu IRC5

Tab. 2-8: Systém strojového vidění na pracovišti ABB IRB 360

2.2.1 Kamera Basler scA1300- 32gc

Průmyslová kamera Basler scA1300- 32gc je vybavena barevným CCD snímačem o velikosti 1/3" s rozlišením až 1,2 Mpix. Snímač a ostatní elektronika je umístěna do odolného a kompaktního šasi z hliníkové slitiny, na jehož konci je závit pro objektiv typu C. Produkt je zobrazen na Obr. 2-9 a jeho technické parametry uvádí Tab. 2-9 [15].



Obr. 2-9: Basler scA1300 - 32gc

Název:	scA1300- 32gc
Výrobce:	Basler
Obrazový snímač:	CMOS 1/3" barevný
Typ závitu objektivu:	C
Formát videosignálu:	Mono 8, Bayer BG 8, Bayer BG 16, Bayer BG 12 Packed, YUV 4:2:2 Packed, YUV 4:2:2 (YUYV) Packed
I/O:	I: 2 x optoizolovaný digitální vstup O: 4 x optoizolovaný digitální výstup
Komunikace:	EtherNet
Výkonnost:	32 snímků/s
Max. rozlišení:	1294 x 964
Rozměry:	73,7 x 44 x 29 mm (dle varianty)
Teplota okolí:	0 –50°C
Cenová hladina:	cca 21 000,- Kč [15]

Tab. 2-9: Technické parametry produktu Basler scA1300-32gc

2.2.2 Fujion HF9HA-1B

Objektiv HF9HA-1B, znázorněný na Obr. 2-10, je miniaturní objektiv pro průmyslové kamery pocházející ze stejné produktové řady jako objektiv na pracovišti ABB IRB 140 (popsán v kap. 2.1.2). Konstrukce objektivu je kovová, zaostřování a změna clony se provádí ručně (mechanismus vybaven aretací). Technické parametry uvádí Tab. 2-10 [45].



Obr. 2-10: Fujinon HF9HA-1B

Název:	HF9HA-1B
Výrobce:	Fujifilm
Rozměry:	Ø28.5 - 35 mm
Ohnisková vzdálenost:	9 mm
Rozsah clony:	F1,4 - 16
Velikost snímáče:	2/3"
Závit objektivu:	C
Nastavení clony:	ruční
Zaostřování:	ruční
Min. vzdálenost objektu:	100 mm
Cena:	3950,- Kč [45]

Tab. 2-10: Technické parametry produktu Fujinon HF9HA-1B

2.2.3 PC pro zpracování obrazu

Pro zpracování obrazu je na pracovišti ABB IRB 360 použito kancelářské PC s dvoujádrovým procesorem Intel G630 pracujícím na frekvenci 2,7 GHz a integrovanou grafickou kartou Intel HD Graphics. Systém má k dispozici 4 GB RAM a 250 GB pevné úložiště zavedené firmy Western Digital. Pro zpracování obrazu je použit framegrabber Cognex, jenž je podrobně popsán na str. 40. Technické údaje počítače jsou shrnuty v Tab. 2-11.

Sestavovatel:	AutoCont
Procesor:	Intel G630, 2x 2,7GHz
RAM:	4 GB
HDD:	250 GB Western Digital WD2500AAKX-001CA0
Základní deska:	Intel Desktop Board DQ77MK (Intel Moccasin Peak)
Framegrabber:	Cognex GigE Network Interface Card, PciE x4
Operační systém:	Windows 7 Professional, Service Pack 1, 32-bit

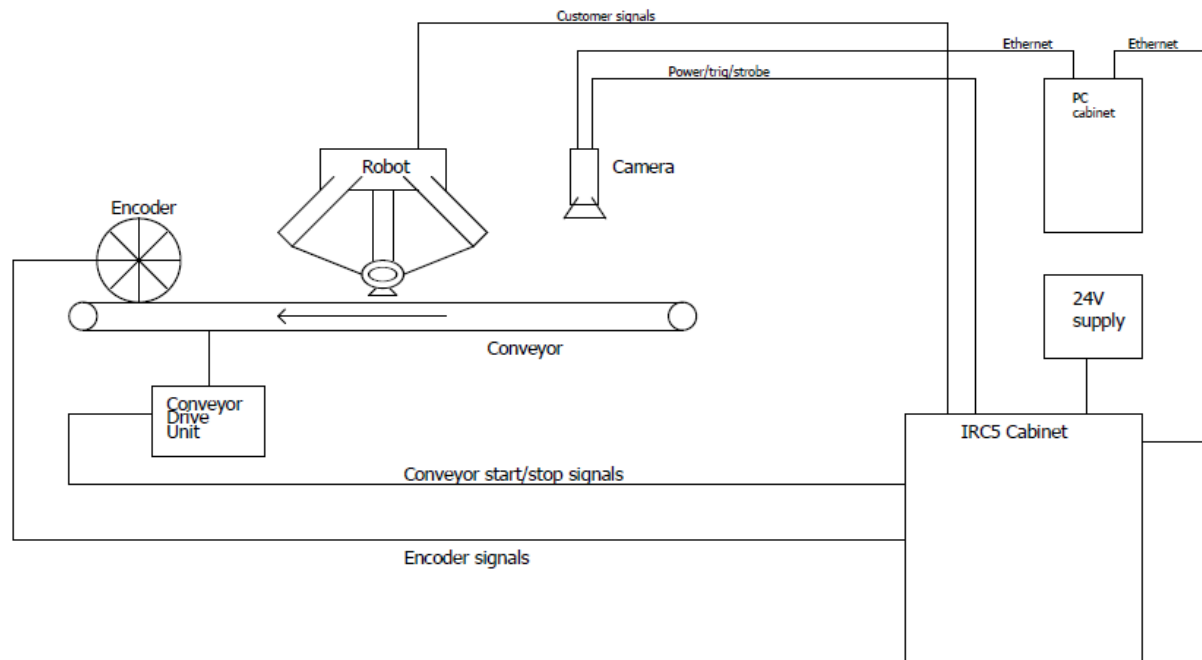
Tab. 2-11: Hardwarová konfigurace PC pro zpracování obrazu

2.2.4 Software pro zpracování obrazu ABB Pickmaster 3

Software ABB Pickmaster představuje komplexní uživatelské rozhraní pro tvorbu úloh na robotizovaném pracovišti ABB IRB 360. Cílem je maximálně uživatelsky zjednodušit programování robotizovaných manipulačních úloh a zefektivnit tak čas programátora. V softwarovém prostředí se vytváří a kalibruje pracoviště, do kterého se definují odebírací a ukládací body a pomocí učení přidávají pracovní objekty. PickMaster 3 v závislosti na definovaných parametrech vytvoří program robotu a po jeho spuštění s ním neustále komunikuje (předává údaje o objektech, jejich pozici a orientaci). Řídicí jednotka robotu poté v závislosti na údajích z enkodéru počká, až se objekty dostanou do pracovního prostoru robotu a následně dojde k jejich odběru. Software ABB PickMaster 3 podporuje spolupráci více robotů na jedné úloze.

2.2.5 Informační tok na pracovišti

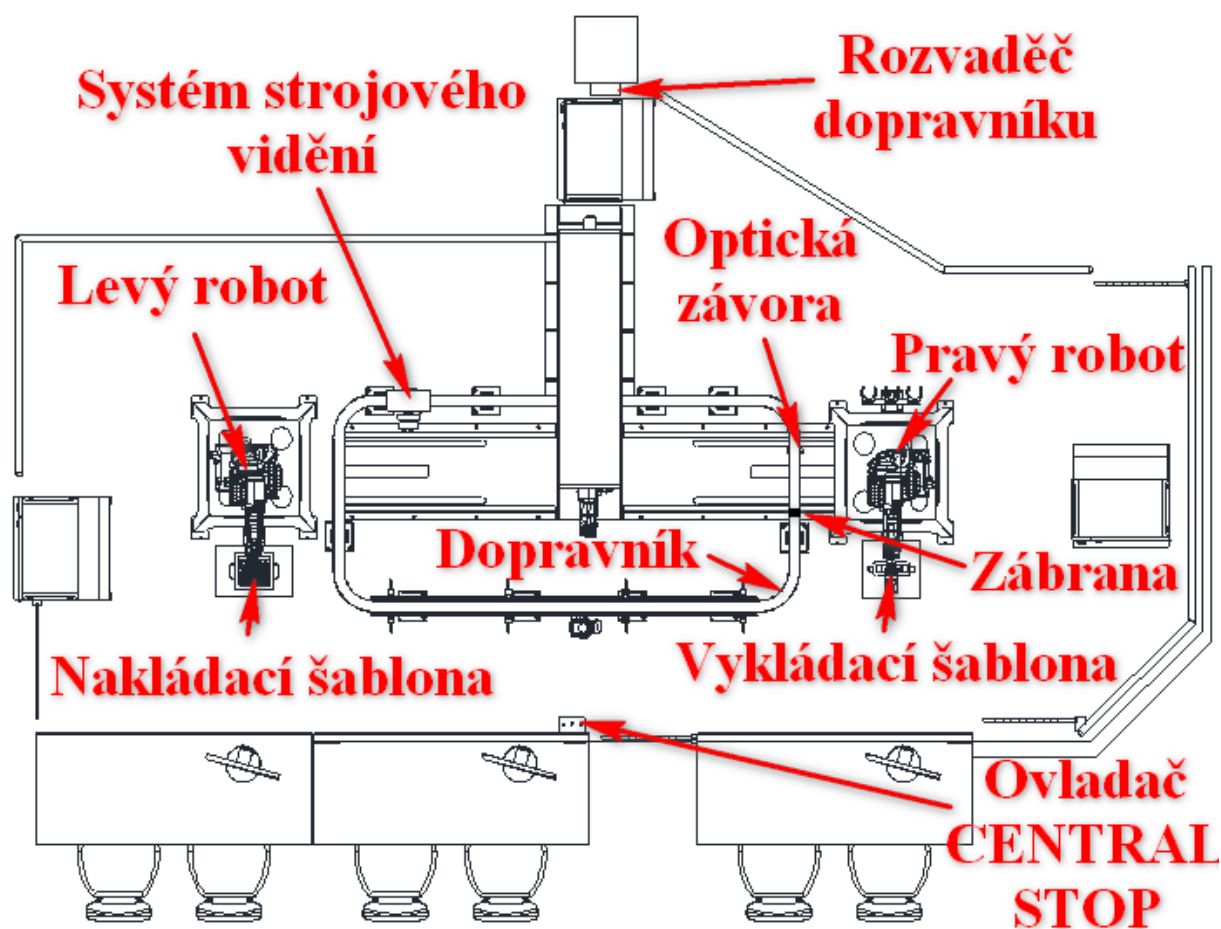
Jak bylo v minulých oddílech popsáno, všechny prvky robotizovaného pracoviště tvoří za obvyklých provozních podmínek integrovaný celek. Systém vyhodnocení obrazu je součástí softwarového prostředí ABB Pickmaster 3, jehož prostřednictvím také komunikuje s řídicí jednotkou robotu. Schéma informačního toku pracoviště, znázorněné na Obr. 2-11 dává představu o distribuci jednotlivých funkcí. Bližší informace o jednotlivých systémech robotizovaného pracoviště uvádí ve své diplomové práci Bc. Jakub Mžík [4], který se přímo zabývá řešením rozmanitých typů úloh na pracovišti ABB IRB 360.



Obr. 2-11: Schéma informačního toku pracoviště ABB IRB 360 [11]

3 Demonstrační úloha na pracovišti ABB IRB 140

Vzhledem k technickým možnostem pracoviště, jakož i dosavadních zkušeností s realizací úloh v laboratořích Katedry robototechniky, byla sestavena demonstrační úloha „Tvorba slov“. Schéma pracoviště je na Obr. 3-1. Cílem je vytvořit slovo čítající max. 5 písmen, jež bude následně roboty složeno z barevných kostek s písmeny. Pracoviště se bude ovládat přes nadřazené PC, kde bude vytvořeno interaktivní HMI tak, aby případní návštěvníci katedry byli schopni vytvořit slovo a spustit program. Po aktivaci spustí levý robot dopravník a začne na něj pokládat kostky ze zásobníku. Systém strojového vidění rozliší barvu a znak na kostce a tyto údaje pošle do nadřazeného PC prostřednictvím RS-232. Řídicí program vyhodnotí, jestli daná kostka splňuje podmínky pro umístění na některou pozici ve slově a odešle zprávu pravému robotu, který kostku v okamžiku sepnutí optické závory za jízdy odebere. Nevyhovující kostky robot přesune za zábranu na dopravníku. Po složení slova čeká pravý robot na pokyn k jeho vyložení a ukončení programu. Dispoziční schéma pracoviště je k dispozici v příloze A, schéma zapojení elektrických signálů v příloze B. Videoukázka zpracované úlohy je k dispozici v multimediální příloze.



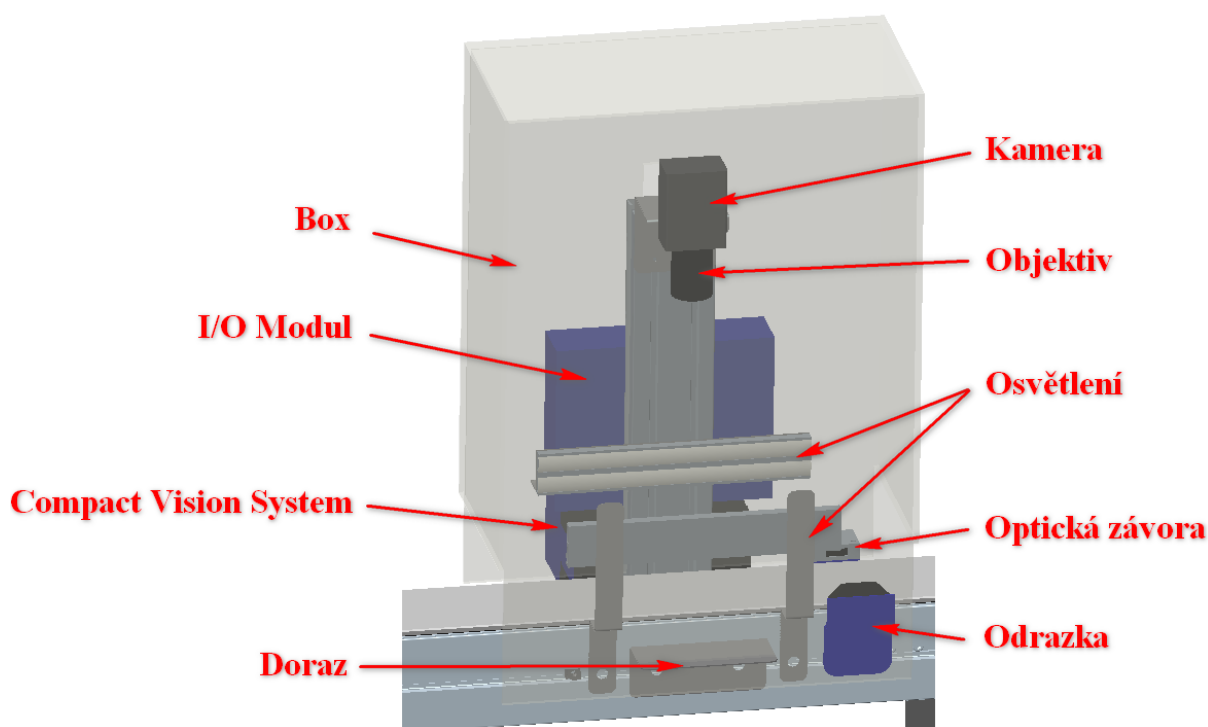
Obr. 3-1: Schéma pracoviště ABB IRB 140

Takto popsaná úloha využívá naprostou většinu robotů a periférií dostupných na pracovišti a klade značné nároky na programátora, mezi něž patří např.:

- Znalost tvorby HMI a programovacího jazyka (použit C#)
- Znalost funkcí pro zpracování obrazu a programování systému strojového vidění (použit NI Vision Builder for Automated Inspection)
- Znalost osvětlovacích metod při aplikacích strojového vidění
- Znalost problematiky programování robotů a programovacího jazyka RAPID
- Znalost komunikace po RS-232
- Znalost zapojení, funkce a správného použití jednotlivých periférií
- Znalost návrhu a realizace technických prostředků pracoviště (PTC Creo)
- Znalost tvorby počítačové simulace pracovní úlohy robotů (ABB RobotStudio)

3.1 Systém strojového vidění

Systém strojového vidění je se všemi jeho hardwarovými prvky i perifériemi, určenými pro správnou funkci úloh „Tvorba slov“ a „Třídění barevných puků“ (realizováno v r. 2012), je znázorněn na Obr. 3-2. Jednotka CVS dále komunikuje s nadřazeným PC prostřednictvím RS-232 a s pravým (vykládacím) robotem prostřednictvím optoizolovaných digitálních výstupů.



Obr. 3-2: Systém strojového vidění na pracovišti ABB IRB 140

3.1.1 Osvětlení – box

Po minulých zkušenostech s osvětlením strojového vidění na pracovišti ABB IRB 140 bylo navrženo a otestováno zcela nové řešení. Nedostatečnost původního osvětlení pro řešení demonstrační úlohy byla především v přílišné tvrdosti světelného zdroje a jeho špatném natočení vůči kameře. Projevem zmíněných vlastností jsou četné odlesky na povrchu analyzovaných objektů, jak je vidět na Obr. 3-3. Výrazným problémem bylo také zaručení konstantních světelných podmínek na pracovišti, kdy pro správnou funkci nesměly na objekt dopadat přímé sluneční paprsky a laboratoř musela být plně osvětlena zářivkovým světlem.



Obr. 3-3: Nasvětlení lesklých objektů dosavadním osvětlovačem

Pro zvýšení kvality bylo proto nutno jak zabezpečit konzistentní kvalitu obrazu (zejména sytost barev), tak celkově upravit osvětlení tak, aby byly odlesky světelného zdroje minimální.

Pro zabezpečení kvalitních světelných podmínek byl v softwarovém prostředí PTC Creo 1.0 vytvořen model osvětlovacího boxu pro kameru, jenž bude maximálně izolovat vnitřní prostor s kamerou od okolních světelných podmínek. Již při fázi návrhu bylo myšleno na snadnou realizaci a manipulaci. Proto je box jednoduchých tvarů a je určen k nasunutí na profil z hliníkové slitiny držící kameru. Vertikální pozice je určena dorazem. Model byl exportován do prostředí Autodesk AutoCAD 2012 a v podobě výkresu DWG byl odeslán do výroby (vyřezání vodním paprskem na Oddělení dezintegrace materiálů Akademie věd ČR). Jako polotovary byly použity desky z pěněného PVC o tloušťce 4 mm dodané společností Portaflex [21]. Vyřezané stěny byly pečlivě slepeny epoxidovým lepidlem. V kritických místech byly použity výztuhy. Sestavený box, umístěný na pracovišti, je na Obr. 3-4. V případě potřeby mohou být na vstupní a výstupní otvor nalepeny clony pro dokonalejší zastínění vnitřního prostoru, během testování se to však neukázalo jako potřebné a sestavený box spolehlivě zaručuje konstantní světelné podmínky.



Obr. 3-4: Box na kameru

Jako zdroj osvětlení byla Bc. Martinem Soukupem vybrána výkonná LED páska, jež je zobrazena na Obr. 3-5 s parametry uvedenými v Tab. 3-1 [33].



Obr. 3-5: LED páska

Výrobce:	Premium Line Lighting
Barva světla:	6 000 – 6 500 K
Počet LED:	60/m
Vyzařovací úhel:	120°
Napětí:	12 V
Spotřeba:	14,4 W/m
Stupeň krytí:	IP 20

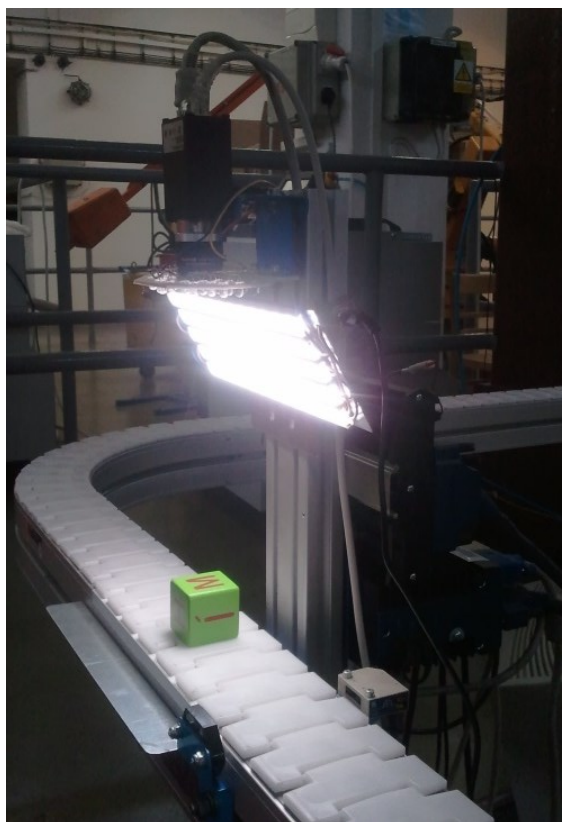
Tab. 3-1: Technické parametry LED pásky

Napájení osvětlení je zajištěno 18W stabilizovaným spínaným zdrojem Sunon MW 12V/1,5A, jehož technické parametry shrnuje Tab. 3-2 [39].

Výrobce:	Sunon
Napětí:	12 V
Max. proud:	1,5 A
Konektor:	5,5 x 2,1 mm
Cena:	200,-Kč [39]

Tab. 3-2: Technické parametry stabilizovaného zdroje

Dále byl dodán profil z hliníkové slitiny pro upevnění LED pásky a plastový difuzor změkčující vyzařované světlo. Z uvedených prvků bylo vytvořeno 5 osvětlovacích modulů o délce 200 mm, jež byly spájeny dohromady a připevněny na plechový držák s konektorem. Výsledné osvětlení je znázorněno na Obr. 3-6. Většina paprsků nebude, jako v případě prstencového osvětlení, dopadat přímo na plochu a odrážet se do objektivu, ale díky bílým stěnám kamerového boxu dojde k vícenásobnému odrazu světla, což umocní žádanou redukci odlesků a stínů.



Obr. 3-6: Prototyp osvětlovacího pole

Osvětlovací modul byl provizorně připevněn ke sloupku kamery a zapojen. Pro žádanou funkci byl nasazen kamerový box. Během testování se ukázalo, že dané řešení splňuje jmenované požadavky pouze částečně. Výsledek je nejlépe vidět na lesklé ploše barevných puků (Obr. 3-7). Perfektní výsledek je vidět v horní části obrazu, kde dominuje podíl světla odraženého o stěnu světelného boxu. Ve spodní polovině je však vidět, že vyzařovací úhel LED diod je tak velký, že některé paprsky osvětlují plochu přímo a proto zde vznikají nežádoucí odlesky. Pro vylepšení situace bylo osvětlení různě natáčeno a posouváno, avšak odlesky se tímto způsobem nepodařilo zcela eliminovat.



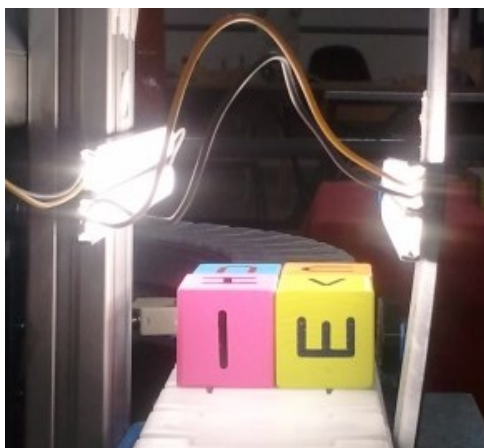
Obr. 3-7: Nasvětlení lesklého povrchu osvětlovacím polem

V případě nasvětlení kostek není popsáný problém tak výrazný, neboť je jejich povrch matnější. Přesto však lze na Obr. 3-8 vidět změnu intenzity zelené barvy od téměř bílé (spodní část s osvětlením) až po světle zelenou (horní část snímku). Tato změna může přinést výrazné komplikace při barevné analýze. Proto bylo určeno, že testovaný způsob nasvětlení je nevyhovující a musí se upravit.



Obr. 3-8: Nasvětlení matného povrchu osvětlovacím polem

Díky modulární konstrukci osvětlení bylo snadné moduly rozdělit a různě testovat. Experimentálně bylo zjištěno, že nejlepší výsledky poskytuje boční nasvětlení, kdy na každé straně dopravníku jsou umístěny 2 moduly svítící proti sobě tak, jak je znázorněno na Obr. 3-9.



Obr. 3-9: Prototyp osvětlovače složeného z osvětlovacích lišt

Bylo pořízeno několik snímků a zjišťovány rozdíly v RGB kódu v různých oblastech kostky. Postupně bylo osvětlení optimalizováno horizontálním a vertikálním pohybem jednotlivých modulů tak, že rozdíl v RGB kódu v různých oblastech kostky byl snížen z původních 50 na 20 (např. zelená kostka má v protilehlých rozích RGB kódy 68,150,88 a 58,135,83), jak je také vidět na Obr. 3-10 a Obr. 3-11. Vzhledem ke kvalitě snímků bylo toto řešení označeno jako definitivní.



Obr. 3-10: Nasvětlení lesklého povrchu



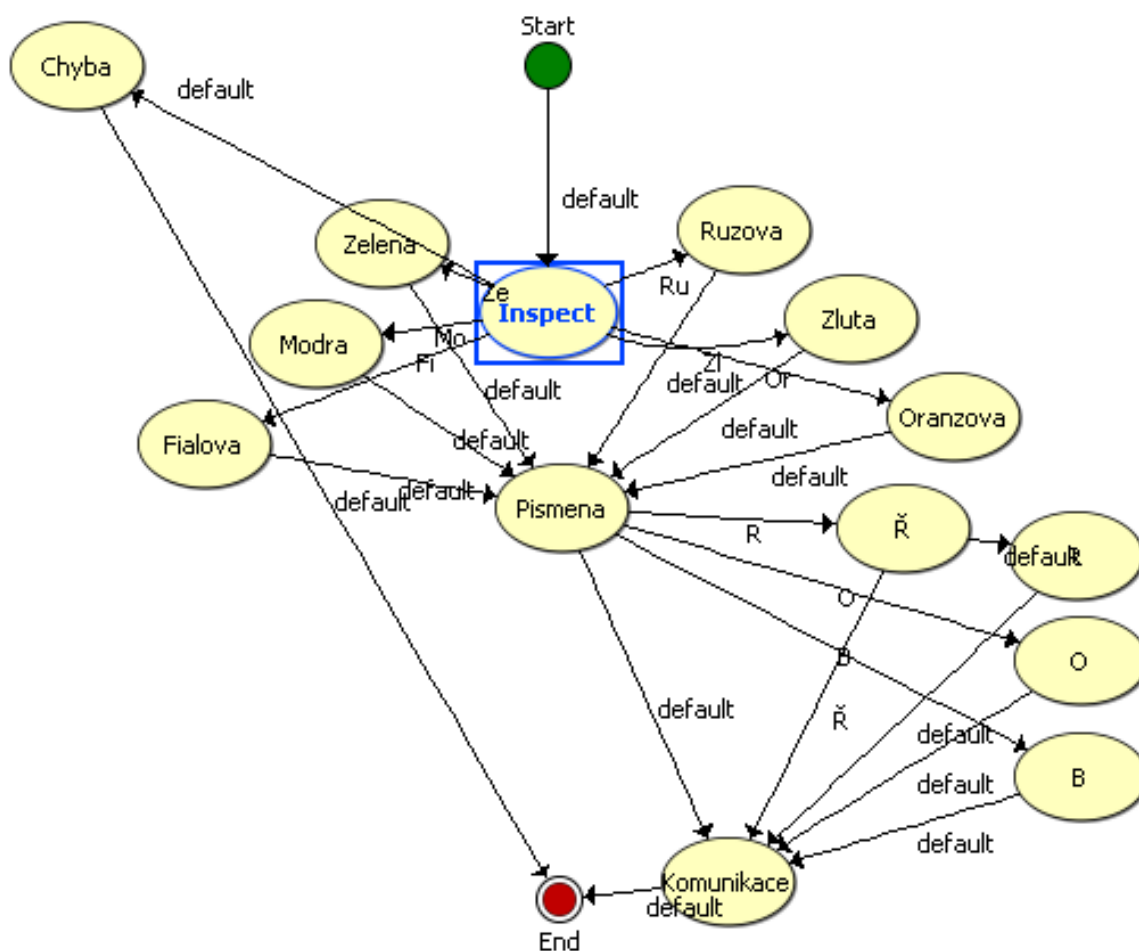
Obr. 3-11: Nasvětlení matného povrchu

3.1.2 Program

Po řádné instalaci všech prvků strojového vidění a jejich otestování byl vytvořen program v uživatelském prostředí National Instruments Vision Builder for Automated Inspection. Hlavním úkolem programu bylo pořídit v pravý čas snímek z kamery, poznat barvu na kostce a přečíst písmeno zde vytištěné. Celkem je na kostkách 34 písmen a 6 barev. Možných cest k zadanému cíli je mnoho, avšak při řešení docházelo k vážným potížím (nedostatečná velikost paměti RAM). Po kompletním vyčištění paměti vyhodnocovací jednotky vyšlo najevo, že z uvedených 128 MB RAM lze pro tvorbu programu použít pouze cca 20 MB, zbytek využívá nainstalovaný operační systém. Důsledkem tohoto jevu je nutnost orientovat písmena v matici, neboť funkce čtení textu neumí pracovat s velkým natočením písmene. V následující části textu proto nebude popsán jen způsob rozpoznávání znaků pomocí čtení textu, ale také pomocí různých metod rozpoznávání vzorů.

Struktura programu

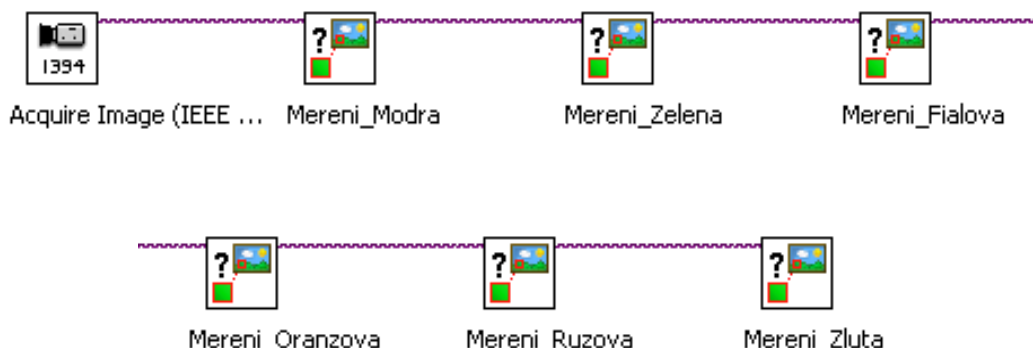
Softwarové prostředí NI Vision Builder for Automated Inspection umožňuje tvořit inspekci pomocí grafického programovacího jazyka. Základní strukturou je diagram obsahující různé stavy a vazby mezi nimi. Na Obr. 3-12 je znázorněn výsledný diagram pro úlohu „Tvorba slov“.



Obr. 3-12: Diagram pro úlohu "Tvorba slov"

Pořízení snímku a rozpoznávání barev

Nejdůležitějším bodem je správné pořízení snímku. Na začátku program přejde ze stavu „Start“ do stavu „Inspect“, v němž jsou zařazeny funkce pro pořízení snímku a rozlišení barev. Pořadí funkcí je znázorněno na Obr. 3-13.



Obr. 3-13: Pořadí funkcí ve stavu "Inspect"

Jak je patrné první krok tvoří samotné pořízení snímku, kde se také nastavují důležité parametry kamery jako expoziční čas, zesílení, úprava jasu, vyvážení barev apod. Při nastavování optimálních hodnot došlo ke střetu protichůdných potřeb v případě nastavování jasu a zesílení – pro správné podání žluté barvy bylo zapotřebí hodnoty držet na co nejnižší úrovni, naproti tomu fialová barva je na snímku tak tmavá, že splývá s okolními stíny. Muselo tedy dojít ke kompromisu v mírný prospěch žluté barvy (větší počet kostek a lepší podání ostatních barev). Rovněž bylo nastaveno pořízení snímku za pomoci externího triggeru (optická závora). Pro tento signál je zapotřebí krátký pulz, jinak program nefunguje správně. Z tohoto důvodu nebyl signál z optické závory zapojen do vyhodnocovací jednotky napřímo, ale přes řídicí jednotku levého (nakládacího) robotu. Po aktivaci optické závory a po definovaném zpoždění, kdy robot vykonává svůj normální program, dojde k vyslání digitálního pulzu na trigger vstup vyhodnocovací jednotky, která následně vyšle trigger impuls kameře a dojde k pořízení snímku.

V další fázi dochází k rozpoznávání barev. To se děje za pomoci funkce „Match colors“. Funkce pracuje na principu porovnávání barevného obsahu snímku s referenčním barevným vzorkem pořízeným při definici. Protože dochází k porovnávání celého snímku, tedy i okolí kostky, je výsledné skóre úměrně sníženo. Pečlivým nastavením prahových hodnot (limit celkového skóre funkce, při jehož překročení je daný krok úspěšný) však lze zabezpečit konzistentní výsledky.

Použití barevného filtru a morfologické operace

Po úspěšném určení barvy je výhodné barevný obraz převést barevným filtrem do binární podoby. Získá se tak ryze černobílý obraz, kdy odfiltrovaná barva bude bílá a zbytek černý. Díky tomu lze po aplikaci konkrétního barevného filtru provádět další kroky pro všechny kostky společně bez ohledu na původní barvu. Pro aplikaci barevného filtru jsou určeny stavy programu „Zelena“, „Modra“, „Fialova“, „Ruzova“, „Zluta“ a „Oranzova“. Přejít do stavu je určen definovanou vazbou – např. pro přechod ze stavu „Inspect“ do stavu „Zelena“ je nutné, aby byl krok vyhodnocení zelené barvy úspěšný. Jednotlivé kroky stavu „Zelena“ jsou na Obr. 3-14.



Obr. 3-14: Pořadí funkcí ve stavu "Zelena"

Před úpravou obrazu je ještě provedena změna globální proměnné „barva“ na hodnotu uvedenou v Tab. 3-3 (krok „SetZelena“).

Hodnota proměnné:	Barva kostky:
0	fialová
1	modrá
2	oranžová
3	růžová
4	zelená
5	žlutá

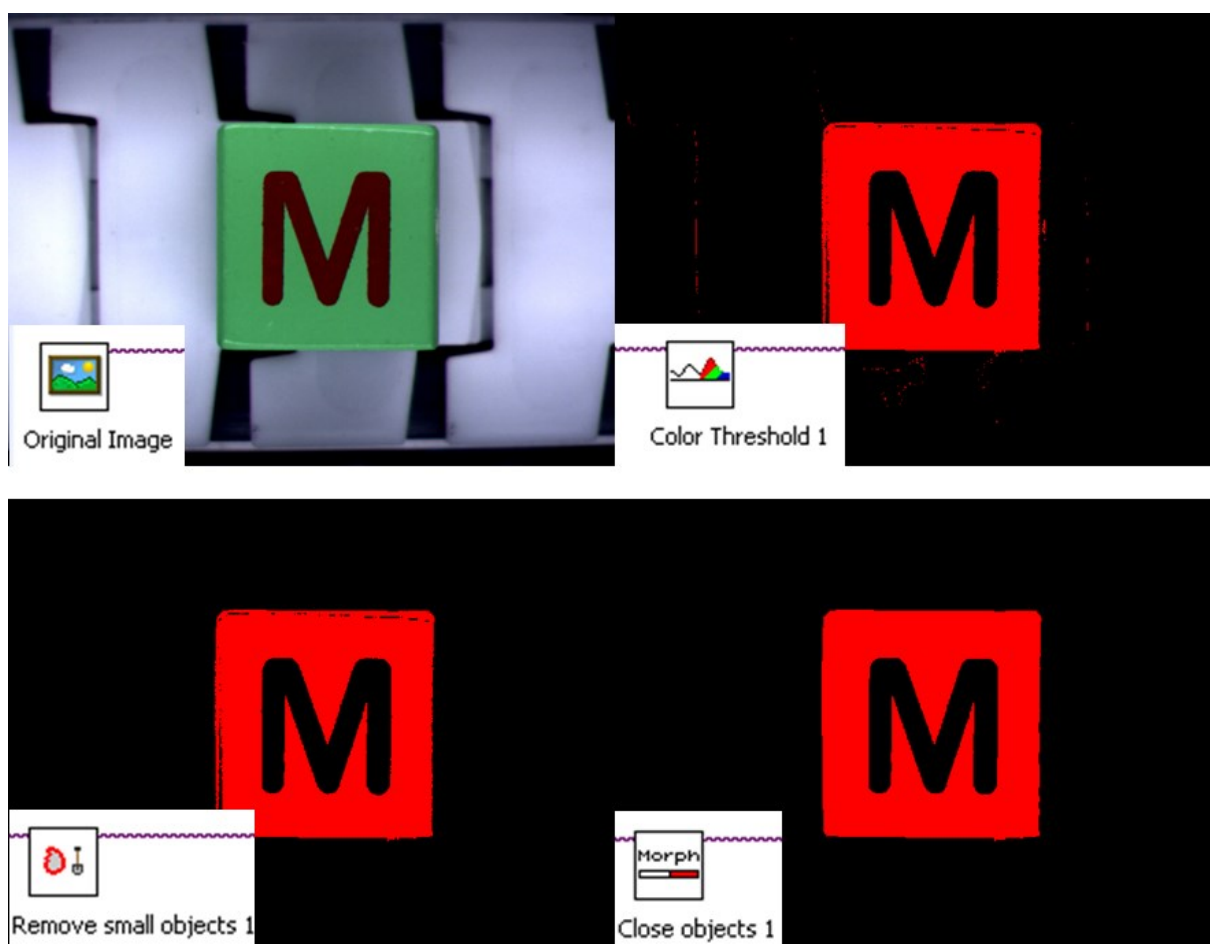
Tab. 3-3: Kódování barvy analyzované kostky v odesílané zprávě

Funkce barevného filtru je obsažena v balíku „Vision Assistant“, což je množina funkcí pro základní úpravu obrazu před vlastní analýzou. Zde se pak přidávají jednotlivé kroky podobně jako v jednotlivých stavech.

Při tvorbě úlohy bylo v tomto kroku v závislosti na rozpoznané barvě použito několik funkcí. Sled použitých funkcí pro zelenou barvu je na Obr. 3-15, kde jsou jasně viditelné změny po jednotlivých krocích.

Nejprve byl proveden barevný filtr, jenž převedl zelenou barvu na bílou (na obrázku červenou). Po úpravě je však v okolí kostky viditelný šum, k jehož eliminaci byla použita morfologická funkce „Odstranění malých objektů“. Dalším problémem byly drobné odlesky na zkosených hranách kostek, které byly opraveny pomocí morfologické operace „Uzavření objektů“.

Kvůli omezenému výpočetnímu výkonu však při testování docházelo k výpadkům systému strojového vidění a proto byl počet prováděných morfologických operací minimalizován.



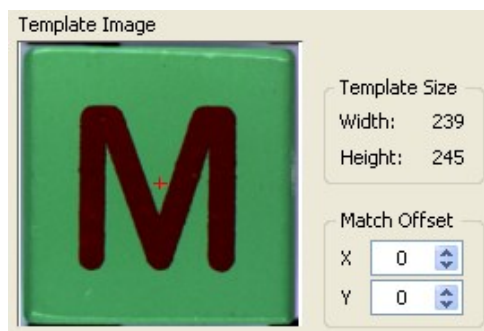
Obr. 3-15: Sled kroků ve funkci "Vision Assistant"

Rozpoznávání znaků

Po rozpoznání barvy a použití vhodného barevného filtru je výsledný černobílý obraz totožný pro všechny kostky (bílá kostka s černým písmenem), čehož se využívá při rozeznávání znaků na kostce (pouze 1 referenční předloha). Cest, vedoucích k úspěšnému rozpoznání písmen na kostkách, je několik. Na následujících stranách se nalézá krátký rozbor možných řešení.

Metoda barevného vzoru

V podstatě nejjednodušší variantou, jak získat kvalitní výsledek, je použít funkci rozpoznávání barevného vzoru. Jak je z názvu patrné, jedná se o jedinou operaci rozpoznávající definované vzory, kde se obraz nemusí převádět do černobílé podoby. Pro definici barevného vzoru stačí označit příslušnou oblast na snímku a případně doplnit několik dodatečných informací (poloha středu, povolení natočení...). Systém se daný vzor naučí a je ihned připraven k analýze. Příklad uloženého vzoru je na Obr. 3-16, kde jsou také viditelné informace o velikosti vzoru v pixelech a možnost nastavení středu, představujícího počátek souřadného systému barevného vzoru (k tomuto souřadnému systému se vztahuje poloha a orientace objektu).



Obr. 3-16: Předloha pro funkci rozpoznávání barevného vzoru

Jako výhody použití funkce rozpoznávání barevného vzoru lze označit především rychlý, názorný postup, jenž při praktickém testování prokázal vysokou odolnost proti chybnému vyhodnocení jak podobných znaků, tak stejných znaků při výrazně zhoršených světelných podmínkách. Příklad odolnosti vůči světelným podmínkám je uveden na Obr. 3-17, v jehož levé části je podexponovaný snímek a v pravé části přeexponovaný snímek barevné kostky. Rozdíly v expozici byly dány přítomností světelného boxu (na snímku vlevo nebyl box přítomen). Oba snímky byly správně vyhodnoceny. Nevýhodou pak je hardwarová náročnost a pracnost programování (nutnost definovat každý znak pro každou barvu). V praxi se ukázalo, že dostupný systém strojového vidění dokáže pracovat s nejvýše 6 barevnými vzory a proto nelze metodu pro danou aplikaci použít.

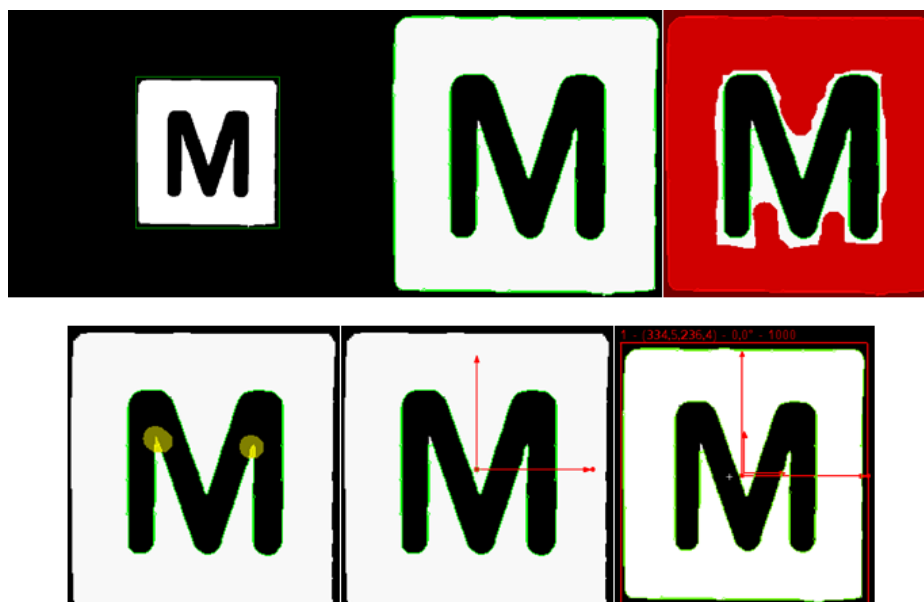


Obr. 3-17: Příklady vyhledávání barevných vzorů při zhoršených světelných podmínkách

Metoda geometrického vzoru

Metoda geometrického vzoru je založena na detekci čar. Vstupem je černobílý obraz a definovaný geometrický vzor, který je v oblasti zájmu hledán. Díky práci s černobílým snímkem jsou hardwarové požadavky méně náročné, než je tomu v případě barevného vzoru. Při definici geometrického vzoru se postupuje podle následujících kroků (průběh tvorby předlohy je znázorněn také na Obr. 3-18):

1. Volba oblasti na snímku (označení oblasti, kde se nalézá geometrický vzor).
2. Definice oblasti (oblast nepatřící do objektu se označí červeně a nedojde zde k vyhledávání obrysů).
3. Definice křivek (problematické části křivek se mohou označit žlutě, což má za následek vynechání oblasti při hodnocení celkového skóre)
4. Definice počátku souřadného systému
5. Nastavení skóre a pokročilá nastavení

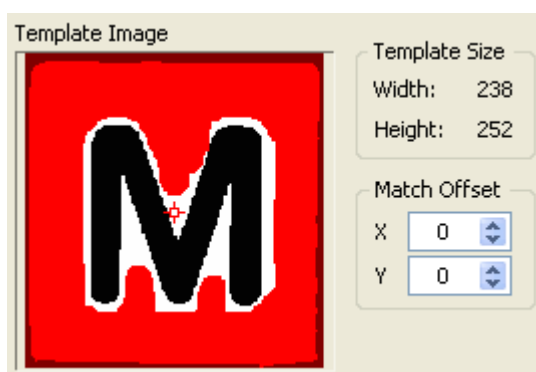


Obr. 3-18: Tvorba předlohy pro metodu geometrického vzoru

Vzhledem k poměrně vysoké hardwarové náročnosti, nízké rychlosti vyhodnocení a zdlouhavé definici, se metoda hledání geometrického tvaru jeví jako nejméně vhodná. Přesto pro omezený počet objektů je způsob funkční.

Metoda hledání tvaru

Metoda hledání tvaru se v mnohém podobá metodě hledání geometrického tvaru (vstup černobílý obraz, definice vzoru). Hlavní rozdíl spočívá v hledání vzoru pomocí intenzity pixelů. To má za následek další snížení hardwarové náročnosti. Jednodušší je rovněž definice předlohy, kde odpadá krok definice křivek a možnost posunutí středu je pouze volitelná. Stačí tedy pouze vybrat objekt, eventuálně označit oblasti, které se nemají analyzovat a nastavit spodní mez skóre pro správné vyhodnocení tvaru. Příklad definované předlohy je na Obr. 3-19.

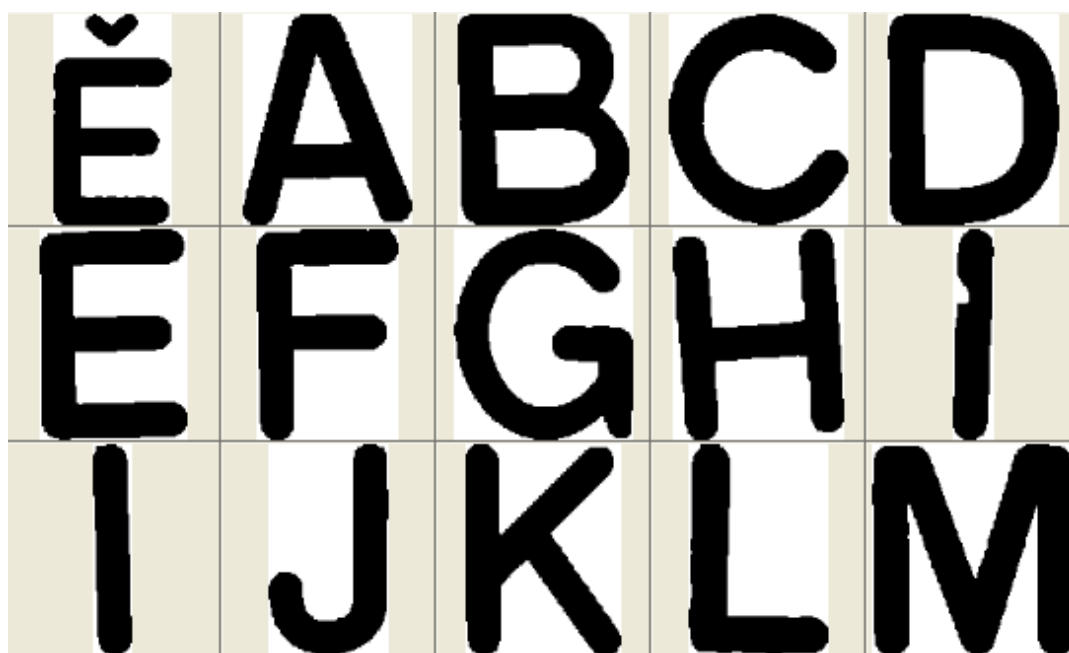


Obr. 3-19: Předloha pro metodu hledání tvaru

I přes relativně nízké hardwarové nároky bylo za pomoci této metody definováno jen cca 20 znaků, což je počet pro potřeby úlohy „Tvorba slov“ nedostačující. Přesto byla metoda použita alespoň pro písmena „R“, „O“ a „B“, pro demonstraci určování orientace kostky.

Metoda čtení textu

Funkce čtení textu se na první pohled zdá optimální variantou řešení dané úlohy. Její výhodou je velmi snadné programování a nízká hardwarová náročnost. Programování spočívá v označení znaku, jeho přidání do databáze a přiřazení správného písmene. Díky tomu, že se znaky definují do databáze, zobrazené na Obr. 3-20, je možno číst písmena v jednom kroku na rozdíl od ostatních metod, kdy by na každé písmeno musel být 1 vzor a tím pádem také 1 krok.

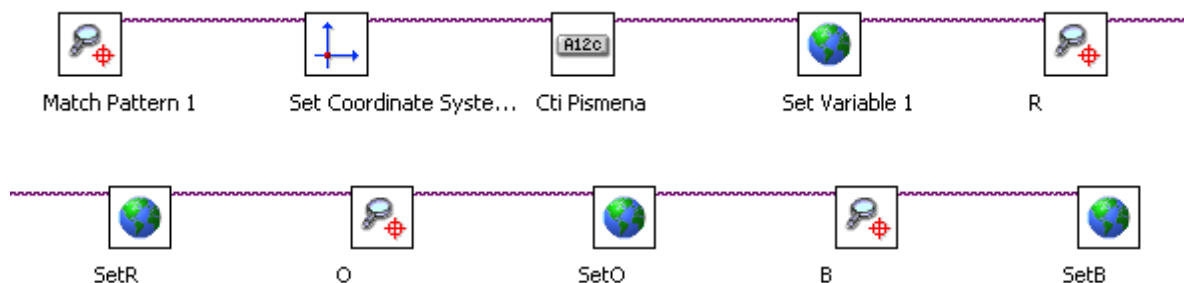


Obr. 3-20: Výtah z databáze předloh pro funkci čtení textu

Velkou nevýhodou však je neschopnost funkce určit pozici a orientaci objektu. Kvůli hardwarové náročnosti ostatních metod se však pro zadanou úlohu a stávající systém strojového vidění nenabízí jiná možnost řešení.

Rozpoznávání znaků pro úlohu „Tvorba slov“

Na základě provedeného testování jednotlivých metod byly pro rozpoznávání znaků použity funkce „Hledání tvaru“ (písmena „R“, „O“ a „B“) a „Čtení textu“ (ostatní písmena). Jednotlivé pořadí funkcí programu, použitých při rozpoznávání znaků, je na Obr. 3-21.



Obr. 3-21: Pořadí kroků ve stavu "Pismena"

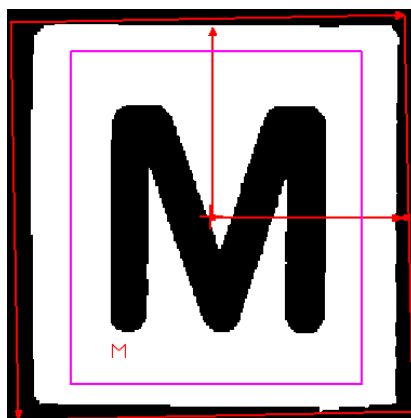
Nejprve je vyhledán tvar kostky (funkce hledání tvaru „Match Pattern 1“). Pro relevantní výsledky je zapotřebí hledat pouze vnější obrys kostky a písmeno z analýzy vynechat (oblast obsahující písmeno se v definici předlohy začervení – viz Obr. 3-22).



Obr. 3-22: Označení prostoru nepatřícího do předlohy

Jako další krok se definuje do středu nalezené kostky souřadný systém, jehož osy budou vždy rovnoběžné s hranicemi snímku.

Při vlastním použití funkce čtení textu je důležité svázat oblast zájmu (ROI) s počátkem definovaného souřadného systému a její velikost nastavit tak, aby ležela uvnitř kostky, a to i při mírném natočení kostky. Výsledek lze vidět na Obr. 3-23, kde je oblast zájmu zvýrazněna fialovým obdélníkem.



Obr. 3-23: Výsledek metody čtení textu

V kroku „Set Variable 1“ je nastavena změna proměnné „pismo“ na zjištěný znak (písmena s diakritikou jsou posílána jako malá písmena bez diakritiky – např. „Ř“ je vyhodnoceno jako „r“).

Pro písmena „R“, „O“ a „B“ jsou použity funkce rozpoznání tvaru („R“, „O“, „B“), podle nichž jsou písmena určena (předloha písmena „R“ znázorněna na Obr. 3-24), následovány funkcemi pro přepsání proměnné „pismo“ na hodnotu 1 („R“), 2 („O“) nebo 3 („B“).



Obr. 3-24: Předloha pro vyhledání tvaru písmene "R"

Úprava proměnných a komunikace

Po získání všech důležitých údajů přejde program do stavu „Komunikace“, kde vykonává kroky zobrazené na Obr. 3-25.



Obr. 3-25: Pořadí funkcí ve stavu "Komunikace"

Nejprve se k údajům o pozici a orientaci přičte 100 pro zabezpečení trojciferného výsledku a následně se odešle řídicímu PC zpráva ve tvaru:

1. Barva.
2. Písmo.
3. Pozice – stovky.
4. Pozice – desítky.
5. Pozice – jednotky.
6. Orientace – stovky.
7. Orientace – desítky.
8. Orientace – jednotky.

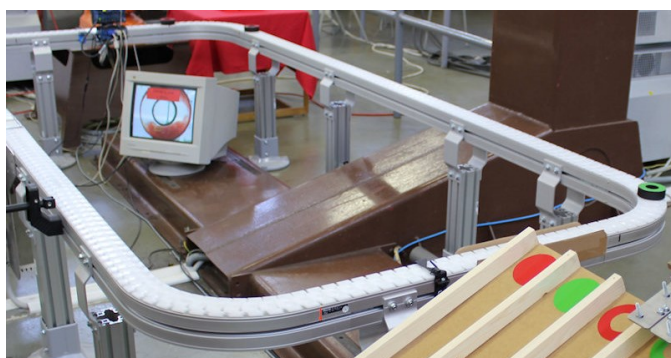
Jelikož vzešla potřeba pravý robot upozornit, že z řídicího PC přijde zpráva o analyzované kostce, pošle systém strojového vidění digitální impuls na vstup řídicí jednotky pravého robotu, dojde k přerušení programu a čtení zprávy. Informace ohledně zapojení lze nalézt v příloze B.

3.2 Dopravník – zapojení, popis, vodítka

Součástí robotizovaného pracoviště je článkový dopravník Rexroth VFS Direct s elektrickým pohonem a frekvenčním měničem Mitsubishi FR-D 720S-042. Realizace proběhla v akademickém roce 2011/2012 v rámci diplomové práce ing. Kamila Byrtuse [1], kde jsou také uvedeny všechny technické údaje a podrobnosti. Z hlediska řízení je frekvenční měnič zapojen na digitální výstupy řídicí jednotky IRC5 levého robotu (viz. schéma v příloze B). Názvy a významy signálů uvádí Tab. 3-4. Dopravník je znázorněn na Obr. 3-26.

Název signálu:	Význam:
DO10_3	povolení běhu
DO10_4	nízká rychlost
DO10_5	střední rychlost
DO10_6	vysoká rychlost

Tab. 3-4: Digitální výstupy řídicí jednotky robotu řídicí dopravník



Obr. 3-26: Článkový dopravník Rexroth

3.2.1 Příslušenství

K dopravníku bylo firmou Rexroth dodáno originální vedení, jež bylo použito na podélné části dopravníku v oblasti kolem pohonu robotu, aby v těchto místech nedocházelo k pádům předmětů z dopravníku. Kromě toho vyvstala potřeba kostky usměrnit tak, aby byla písmena orientovaná ke kameře a střed kostky ležel přibližně v ose pohybu dopravníku. Tomu pomáhají také vodítka vyrobená z kombinace originálního vedení a ohýbaného plechu, jež jsou znázorněna na Obr. 3-27.



Obr. 3-27: Vodítka pro barevné kostky

3.3 Levý robot

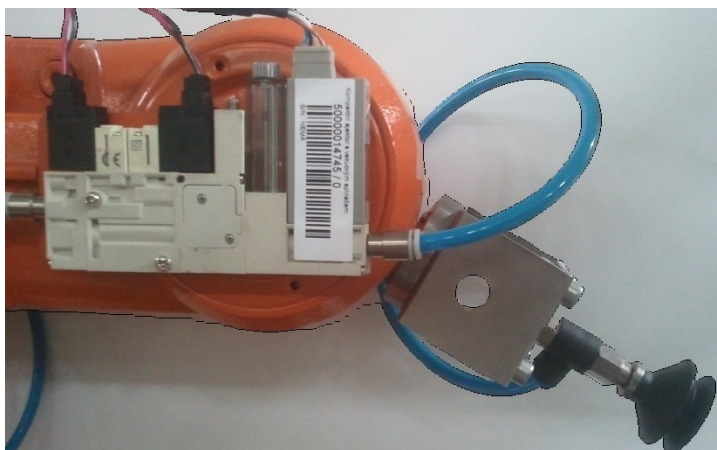
Na pracovišti se nachází 3 roboty ABB IRB 140. Jedná se o malé angulární roboty s 6 stupni volnosti a nosností max. 5 kg. Levý robot slouží pro nakládání kostek ze zásobníku kostek na dopravník. Pro daný účel je vybaven efektem s přísavkou, ejektorem a zásobníkem kostek. Na Obr. 3-28 je znázorněn levý robot ve výchozí poloze úlohy „Tvorba slov“.



Obr. 3-28: Levý robot a jeho periferie

3.3.1 Efektor s přísavkou

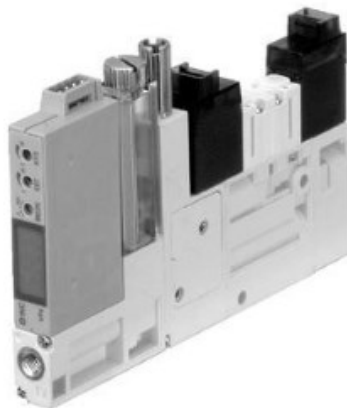
Pro uchopování objektů manipulace (jak pro účely úlohy „Tvorba slov“, tak pro praktické ukázky na dnech otevřených dveří a jiných akcích katedry) byl Bc. Martinem Soukupem upraven efektor Ing. Jaroslava Tomáše [7] tak, aby obsahoval pouze 1 přísavku. Efektor je znázorněn na Obr. 3-29.



Obr. 3-29: Efektor s přísavkou

3.3.2 Ejektor

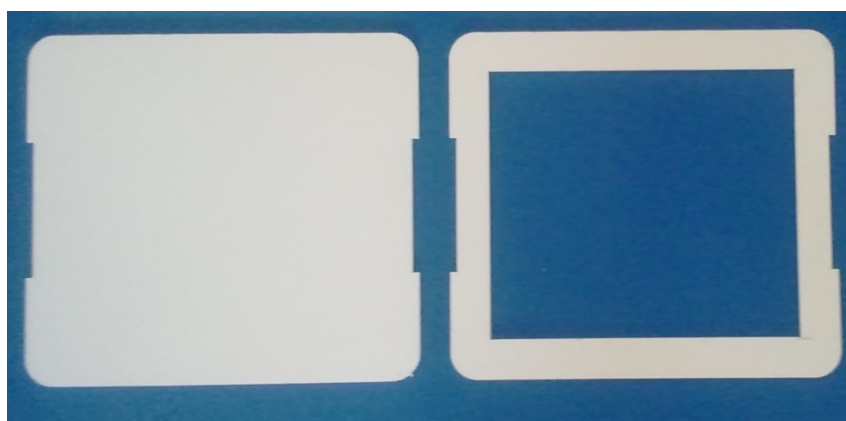
V rámci diplomové práce na téma „Realizace efektoru s přísavkami pro PR ABB IRB 140“ byl ing. Jaroslavem Tomášem vybrán a nainstalován ejektor firmy SMC Pneumatics ZQ1101U-K1Y5LO-D52CL-Q. Ejektor se vyznačuje kompaktními rozměry a integrovaným senzorem podtlaku s dvěma nastavitelnými digitálními výstupy pro zpětnou vazbu. Více informací o ejektoru lze nalézt v diplomové práci ing. Jaroslava Tomáše [7]. Schéma zapojení je v příloze B. Ejektor je zobrazen na Obr. 3-30.



Obr. 3-30: Ejektor

3.3.3 Nakládací šablona

Speciálně pro účely úlohy „Tvorba slov“ byl vyroben zásobník kostek s písmeny. Jako materiál byl vybrán 4mm deska z pěněného PVC a izolační materiál Mirelon. Použitím moderních prostředků návrhu v podobě špičkových soudobých CAD systémů (Autodesk AutoCAD 2012 a PTC Creo 1.0) byla docílena rychlá výroba polotovarů za pomoci technologie dělení materiálů vodním paprskem na Oddělení dezintegrace materiálů Ústavu geoniky Akademie Věd České republiky. Na Obr. 3-31 se nacházejí polotovary vyřezané vodním paprskem.



Obr. 3-31: Nakládací šablona

Mezi obě vyřezané části byla vložena 15 mm silná vrstva pěnového izolačního materiálu Mirelon a všechny části byly navzájem slepeny lepidlem Alkaprén.

Pro zabezpečení konstantní polohy a orientace zásobníku vůči robotu jsou boky zásobníku opatřeny výřezy, do kterých přesně pasují vymezující díly nalepené na pracovním stole. Díly byly vyrobeny metodou 3D tisku a jsou zobrazeny na Obr. 3-32.



Obr. 3-32: Tištěné díly vymezující pozici a orientaci šablon

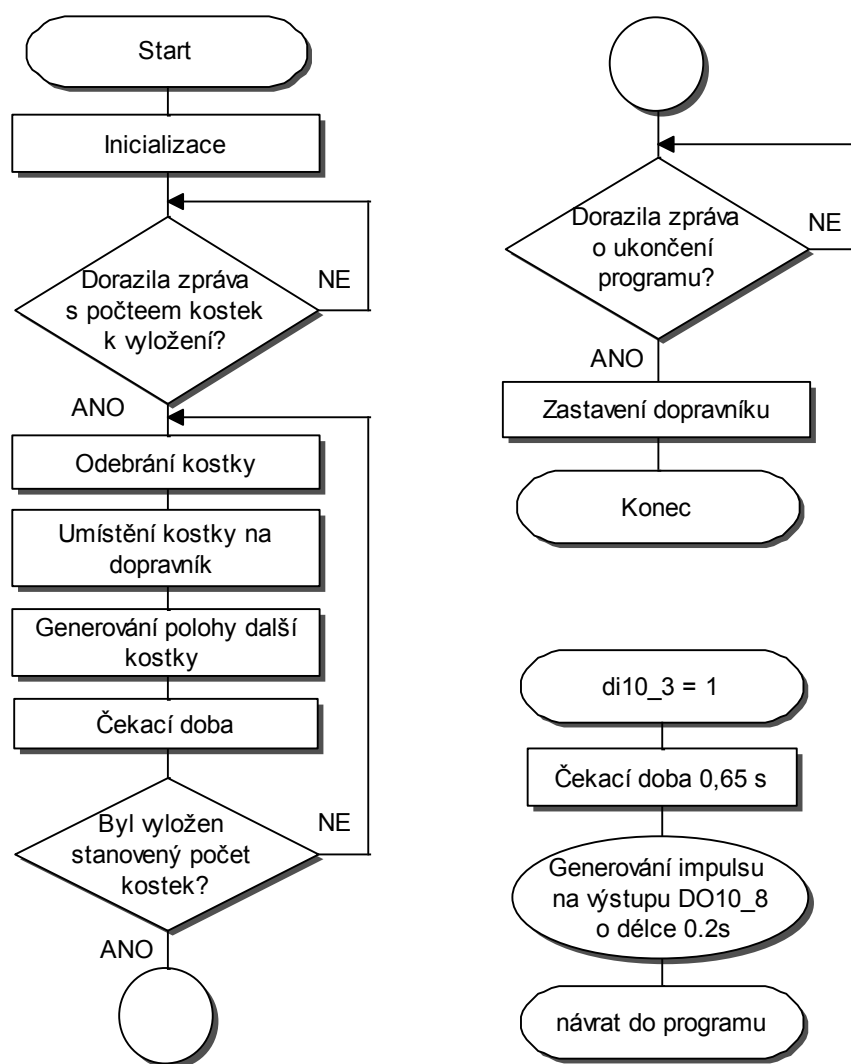
Na Obr. 3-33 se nalézá hotová šablona s kostkami, umístěná na definitivní pozici vymezené tištěnými díly. Šablona je umístěna na vrstvě molitanu. Kostky je zapotřebí v šabloně vždy zarovnat k pravému spodnímu rohu (viz Obr. 3-33).



Obr. 3-33: Vykládací šablona s kostkami

3.3.4 Program

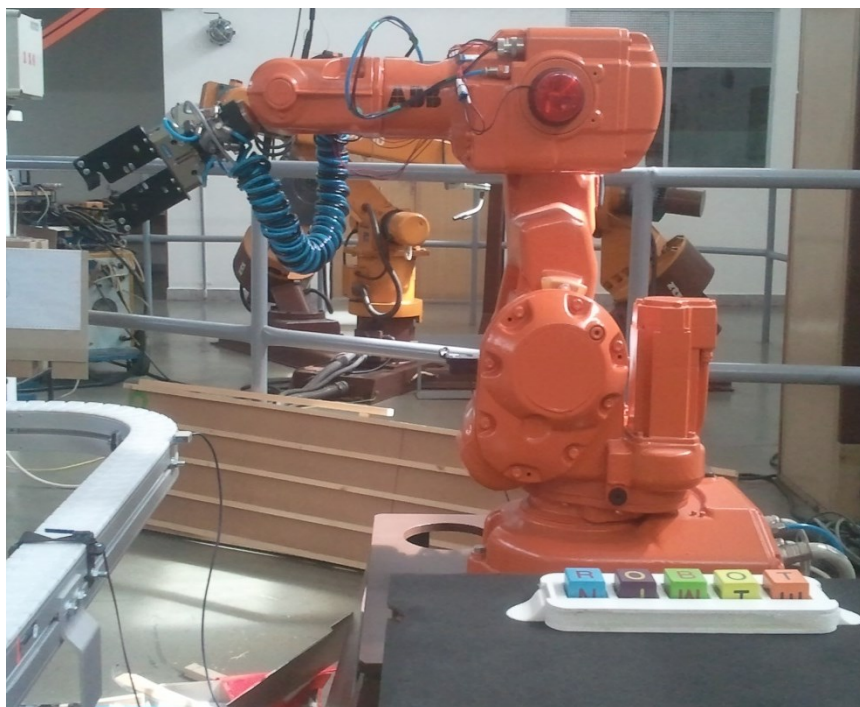
Roboty ABB se programují v softwarovém prostředí ABB Robot Studio v jazyce RAPID. Program levého robotu zahrnuje síťovou komunikaci (příjem zpráv z řídicího PC) a pohybové instrukce pro odebrání kostek z nakládací šablony a jejich pokládání na dopravník. Samozřejmostí je ovládání ejektoru digitálními výstupy (DO10_1 ovládá sání, DO10_2 ovládá foukání). Protože však vyvstala potřeba přijímat signál optické závory kamery a v závislosti na něm vyslat trigger puls do jednotky strojového vidění, bylo do programu vloženo přerušení, které, jako reakci na logickou 1 na digitálním vstupu optické závory, vyšle impuls o délce 0,2s na digitální vstup CVS. Všechny funkce programu nakládacího robotu jsou shrnuty ve vývojovém diagramu zobrazeném na Obr. 3-34. V pravé spodní části obrázku je znázorněno zmíněné přerušení programem optickou závorou.



Obr. 3-34: Vývojový diagram programu levého robotu

3.4 Právý robot

Právý šestiosý angulární robot ABB IRB 140 s šesti stupni volnosti a nosností 5 kg slouží pro odebrání kostek z dopravníku a ukládání do vykládací šablony, popřípadě na dopravník. Kvůli úloze „Třídění puků“, řešené v akademickém roce 2011/2012 autorem, Bc. Jakubem Mžíkem a Bc. Martinem Soukupem je v části dopravníku obsluhované pravým robotem nainstalována zábrana sloužící jako doraz pro puky a místo, odkud je robot orientované odebere a odloží. Aby se zabránilo kolizi kostek se zábranou, je proto nutné i nevyhovující kostky odebrat a přenést za zábranu. Robot je dále vybaven pracovním efektem Schunk PGN80, systémem rychlé výměny efektorů Schunk SWS 005, pneumatickým rozvaděčem CKD Valve 4SA120, optickou závorou pro detekci kostek a vykládací šablonou. Vykládací robot s popsanými periferiemi je znázorněn na Obr. 3-35.



Obr. 3-35: Právý robot a jeho periferie

3.4.1 Efektor Schunk PGN80

Efektor Schunk PGN80 je univerzální dvouprstý aktivní mechanický úchopný efektor poháněný pneumotorem. Podle klasifikace mechanických úchopných efektorů se jedná o typ T1 [5] (vstupní i výstupní pohyb lineární). Parametry efektoru jsou shrnuty v Tab. 3-5 [46].

Název:	PGN 80
Výrobce:	Schunk
Svírací síla:	415 N
Pracovní tlak:	2,5 – 8 bar
Celkový posuv:	16 mm
Hmotnost:	0,5 kg

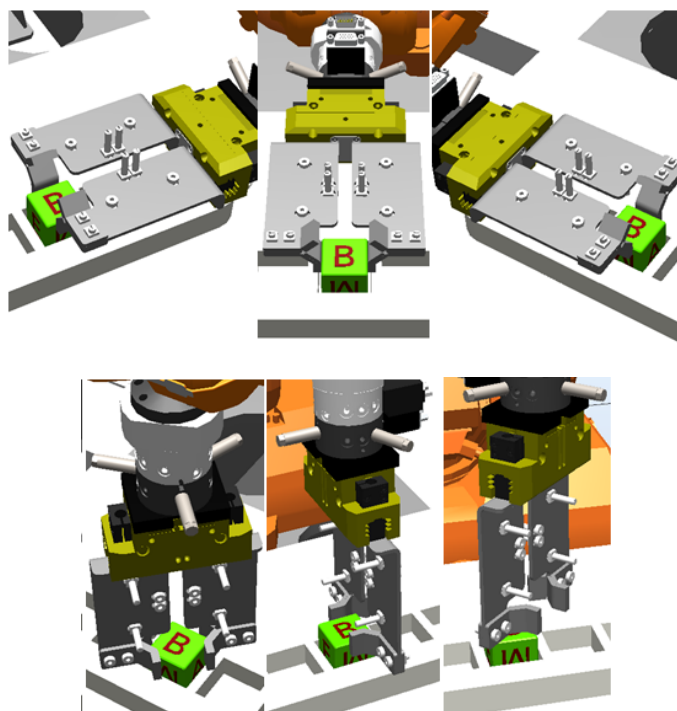
Tab. 3-5: Technické parametry produktu Schunk PGN 80

K popsané části efektoru bylo zapotřebí navrhnout, vyrobit a nainstalovat úchopné prsty. Návrh proběhl za pomoci CAD systému PTC Creo 1.0 a softwarového prostředí ABB Robot Studio, kde byla navržená varianta podrobena simulaci pracovní úlohy a dle zjištěných poznatků upravována. Díky tomuto procesu nemusel být vyroben žádný funkční prototyp. Dle způsobu uchopení se jedná o univerzální víceúčelový efektor, který dokáže uchopovat a manipulovat nejen s kostkami, ale také s barevnými puký. Vyrobené prsty jsou znázorněny na Obr. 3-36.



Obr. 3-36: Čelisti efektoru PGN 80

Různé možnosti uchopení kostek jsou předvedeny na Obr. 3-37.



Obr. 3-37: Možnosti uchopení kostky

3.4.2 Systém rychlé výměny efektorů Schunk SWS 005

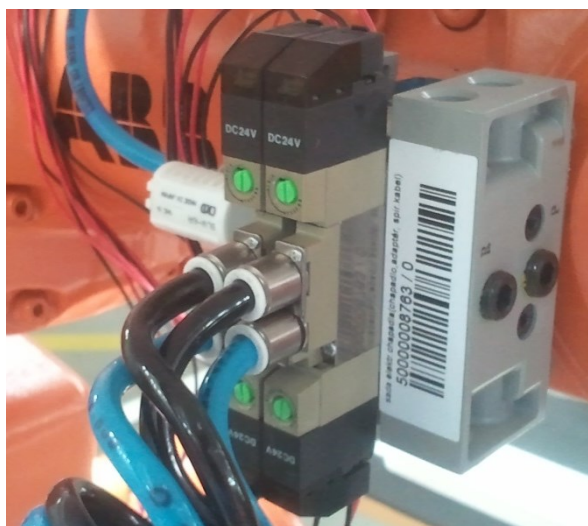
Na vykládacím robotu je od akademického roku 2009/2010 nainstalován systém rychlé výměny efektorů Schunk SWS 005, zobrazený na Obr. 3-38. S pomocí systému lze střídat různé typy mechanických úchopných efektorů dostupné na Centru robotiky. Více informací lze nalézt v diplomové práci Ing. Jiřího Szczeponiece [6], který se integrací systému na pracoviště zabýval. Výměna efektorů není pro účely úlohy „Tvorba slov“ nutná.



Obr. 3-38: Systém rychlé výměny efektorů [6]

3.4.3 Pneumatický rozvaděč CKD Valve 4SA129

Na pravém robotu je umístěn blok se dvěma pneumatickými rozvaděči CKD Valve 4SA129-A2. Pracovní tlak dvoupolohových, třicestných rozvaděčů je 0,2 – 0,7 MPa. Řízení je elektromagnetické se 2 provozními stavy a řídicím napětím 24V. Rozvaděče, znázorněné na Obr. 3-39, jsou určeny k ovládání systému rychlé výměny efektorů a otevírání čelistí aktivního nástroje.



Obr. 3-39: Blok s pneumatickými rozvaděči

3.4.4 Optická závora pro detekci kostek

Jelikož není robotizované pracoviště vybaveno modulem „Conveyor Tracking“ společnosti ABB, ani jinými prostředky pro sledování dopravníku, bude odebrání realizováno „naslepo“. Jako signál pro odebrání kostky bude sloužit digitální výstup optické závory Telemecanique XUM-LH0451, jejíž technické údaje jsou na str. 62.

3.4.5 Vykládací šablona

Slovo je skládáno z barevných dřevěných kostek s písmeny. Pro účely manipulace s hotovým slovem (předvedení publiku) jsou jednotlivé kostky umísťovány do vykládací šablony s 5 otvory, znázorněné na Obr. 3-40. Šablona byla navržena za pomoci CAD systémů Autodesk AutoCAD 2012 a PTC Creo 1.0 a hlavní díly byly následně vyřezány vodním paprskem. Konstrukce je sendvičová, vrchní a spodní díl je vyroben z 4 mm silné desky pěněného PVC a střed tvoří vlepená vrstva izolačního materiálu Mirelon.

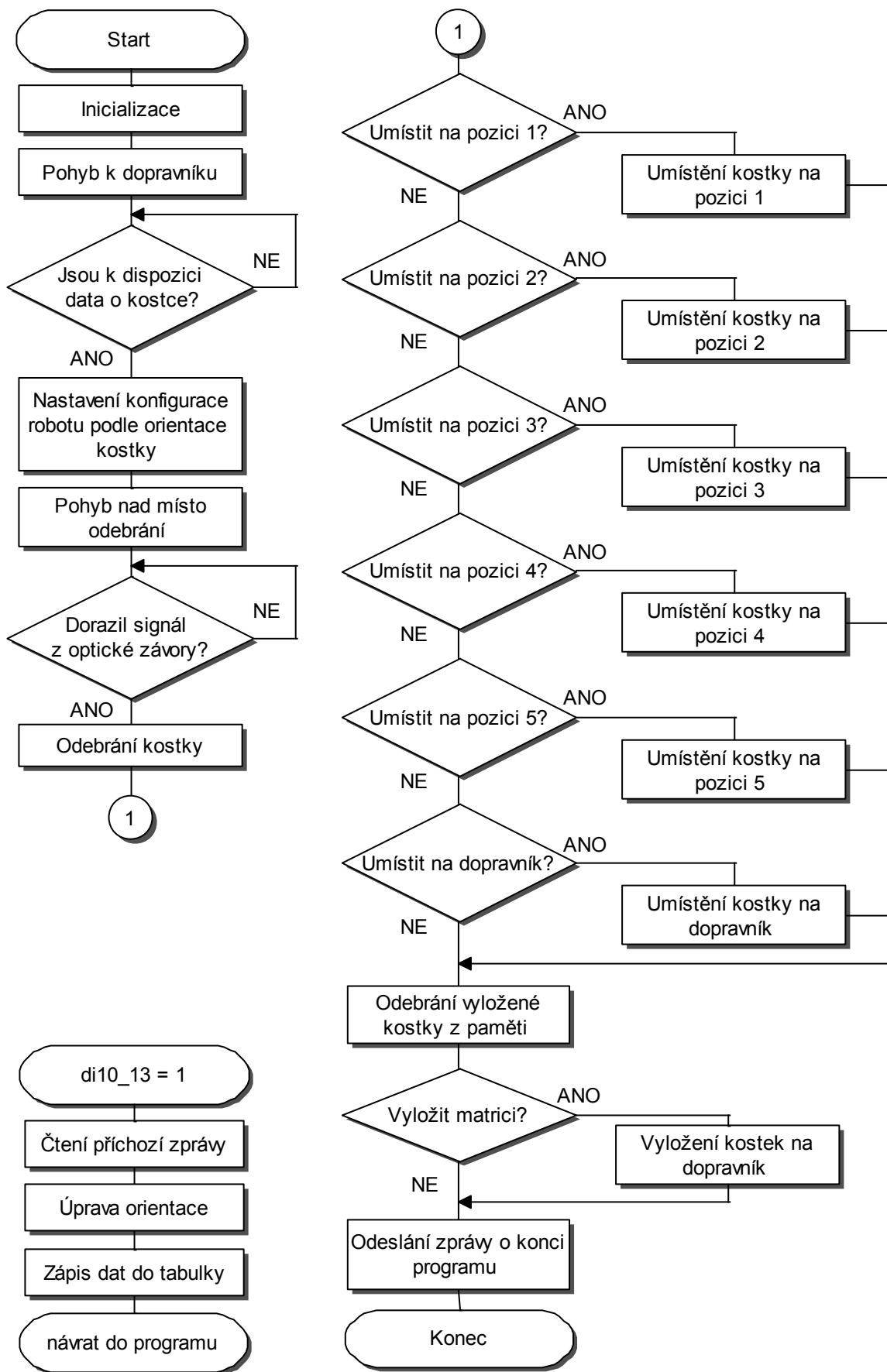


Obr. 3-40: Vykládací šablona

3.4.6 Program

Řídicí program pravého robotu byl napsán v softwarovém prostředí ABB Robot Studio v jazyce Rapid. Jednotlivé činnosti programu jsou přehledně shrnuty ve vývojovém diagramu na Obr. 3-41.

Během testování se ukázala nutnost ukládat přijatá data do tabulky, odkud se dle pořadí používají (odebrání kostek) a následně mažou. Rovněž pracuje program spolehlivěji, když dostane ze systému strojového vidění na digitální vstup impuls, že byla vyhodnocena kostka a v závislosti na tom se hlavní program přeruší a dojde ke čtení zprávy. Posledním testovaným poznatkem byla nutnost zavírat čelisti ještě při konání odebracího pohybu, jinak by, vzhledem k pohybu dopravníku, došlo k nárazu kostky o čelisti a nesprávnému uchopení s následnou deformací kostky.



Obr. 3-41: Vývojový diagram řídicího programu pravého robotu

3.5 Simulace pracovní úlohy v prostředí ABB Robot Studio

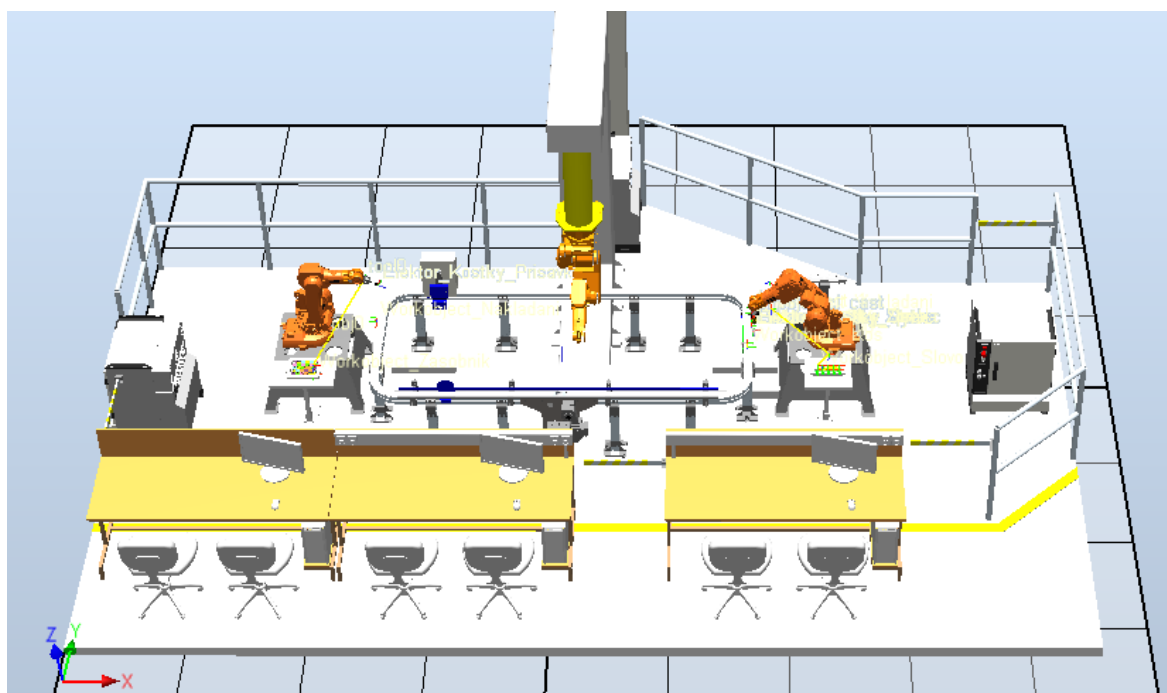
Před výrobou periférií a samotnou realizací úlohy na pracovišti ABB IRB 140 byla provedena simulace celé úlohy v softwarovém prostředí ABB Robot Studio. Díky provedené simulaci byly před výrobou otestovány a upraveny periferie robotu – hlavně efektor ukládacího robotu a obě šablony. Programátor také získá konkrétní představu o dosahu jednotlivých robotů a může tak optimalizovat pozice jednotlivých periférií.

Při vlastní tvorbě simulace je důležité převést 3D model z běžných CAD systémů do formátu .sat. Importovaný 3D model by měl být bez robotů a efektorů. Poté se vytvoří nová *stanice*, tedy robotizované pracoviště pro konkrétní úlohu a model se zde vloží. Pracoviště se doplní o roboty, řídicí systémy jednotlivých robotů a pohyblivé periferie (pohyby periférií je nutno v prostředí Robot Studia definovat, včetně dob pohybu).

Do příslušných míst na robotizovaném pracovišti se vytvoří prvky typu *workobject* (souřadný systém charakterizující pracovní objekt – např. objekt manipulace, dopravník, nakládací šablona) a *robtarget* (souřadný systém udávající konkrétní polohu, kam se má robot pohnout – obsahuje tedy údaje o pozici a orientaci souřadného systému, konfiguraci robotu a pozici externích os).

Následně se vytvoří virtuální jednotka vstupů a výstupů a definují se zde signály, kterým se přidávají simulační události (viditelnost objektu, pohyb kamery, pohyb mechanismů do definované polohy...). Pro simulaci pracovní úlohy bylo použito **73 virtuálních signálů**, k nimž bylo přiřazeno **354 událostí**.

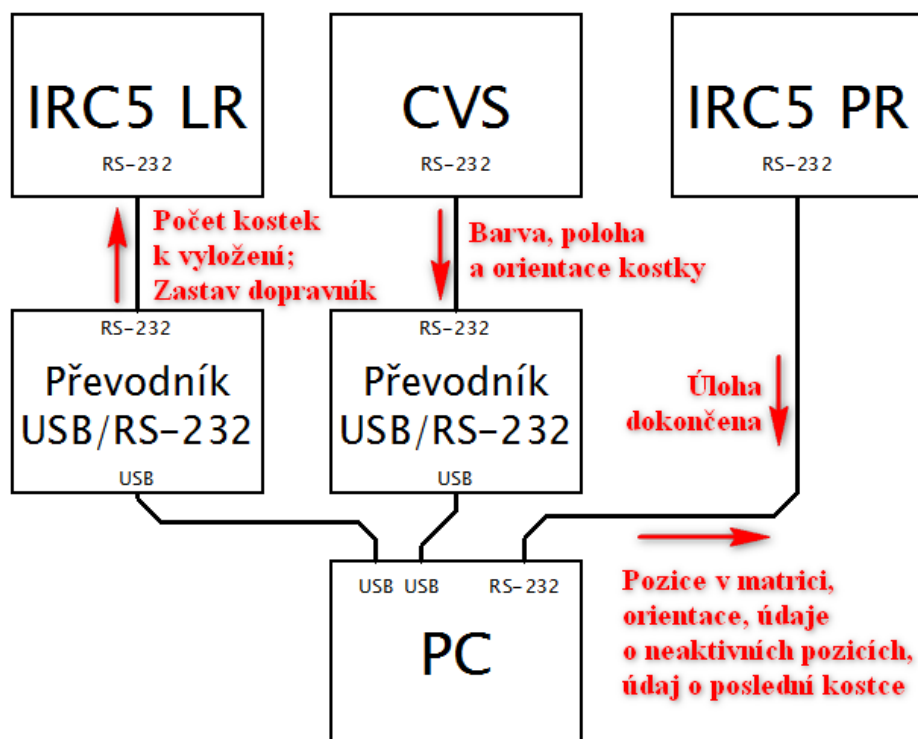
Na Obr. 3-42 se nachází pracoviště ABB IRB 140 v softwarovém prostředí ABB Robot Studio. Videovýstup z provedené simulace je k dispozici ve zvláštní příloze. Simulace ukazuje spolupráci 2 robotů na 1 pracovišti a použití multifunkčního efektoru vykládacího robotu.



Obr. 3-42: Pracoviště ABB IRB 140 v softwarovém prostředí ABB Robot Studio

3.6 HMI

HMI, tedy uživatelské rozhraní člověk-stroj, hraje jednu z nejdůležitějších rolí na robotizovaném pracovišti. V běžné praxi ovládá operátor celé robotizované pracoviště pomocí HMI, což klade zvýšené požadavky na jeho intuitivní použití a spolehlivost. Proto byla vývoji HMI věnována náležitá pozornost. Úloha bude řízena z centrálního počítače, který komunikuje se všemi okolními periferiemi a v závislosti na jejich signálech koná požadované akce. Schéma propojení řídicího počítače s periferiemi včetně popisu komunikace je na Obr. 3-43. Pro tvorbu HMI byl použit programovací jazyk C#. Vývoj tohoto rozhraní si vyžádal značné časové úsilí, což se projevilo také na jeho rozsahu, jenž činí cca **7 000 řádků programu** (140 stran textu velikosti 9,5 v softwarovém prostředí Microsoft Word). Komentovaný zdrojový kód je k dispozici v multimediální příloze dokumentu.



Obr. 3-43: Schéma komunikace při úloze "Tvorba slov"

Jak je z diagramu patrné, řídicí PC nebylo vybaveno dostatečným počtem RS-232 výstupů. Proto pořízeny 2 USB-RS-232 převodníky firmy Manhattan, zobrazené na Obr. 3-44, s přenosovou rychlostí max. 225 kb/s a přepětíovou ochranou [38].



Obr. 3-44: USB/RS-232 převodník Manhattan

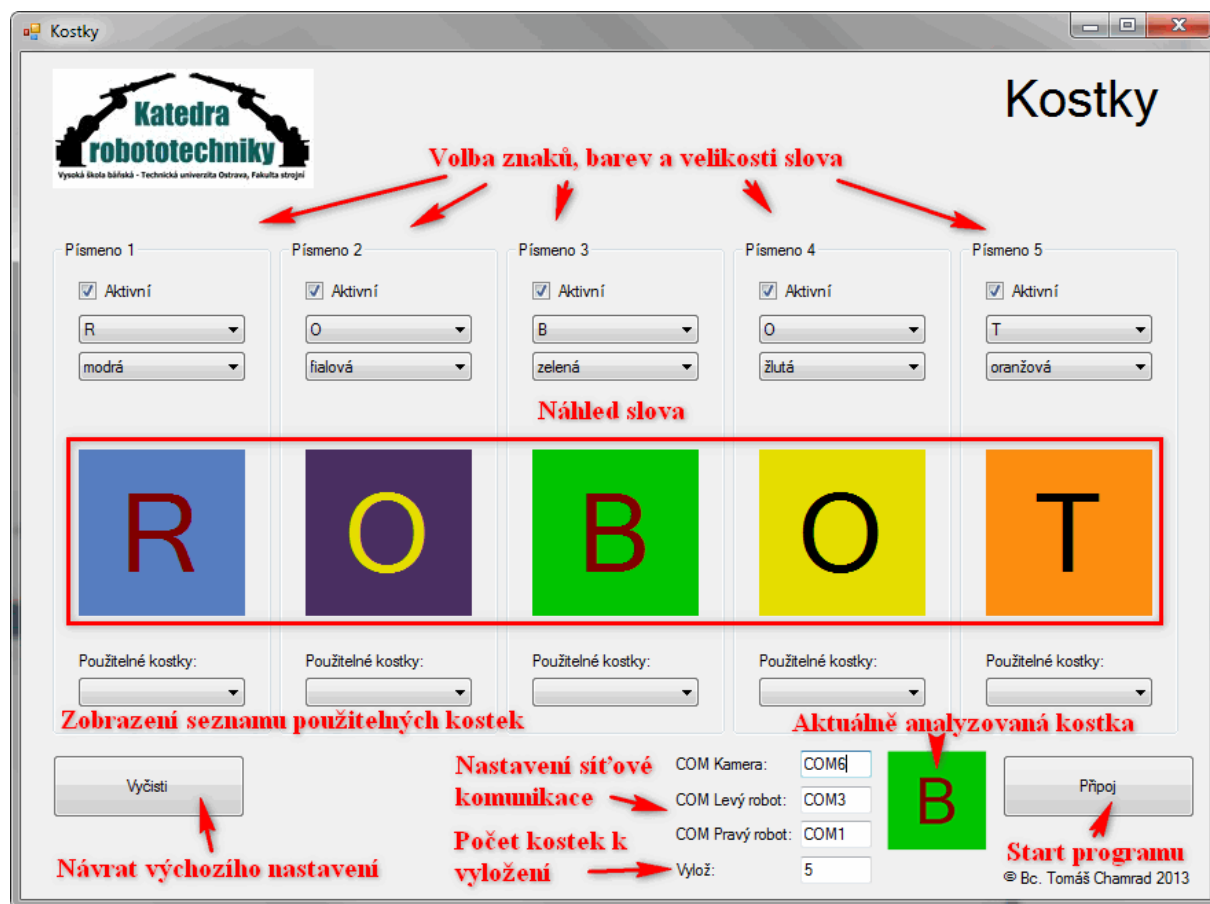
3.6.1 Funkce

Před samotnou tvorbou uživatelského prostředí je nezbytné určit, jaké funkce bude program mít, aby spolehlivě a efektivně řídil danou úlohu. Mezi tyto funkce patří:

- kontrola výběru kostek (zamezení výběru již použitých znaků a barev)
- možnost výběru písmene a barvy na jednotlivých pozicích
- možnost volby, z kolika písmen se bude slovo skládat
- nastavení počtu kostek určených k vyložení
- zobrazení použitelných kostek
- možnost návratu na výchozí hodnoty
- síťová komunikace a její nastavení
- zobrazení aktuálně vyhodnocené kostky
- rozhodovací algoritmus pro umísťování kostek na pozice ve slově nebo na dopravník

3.6.2 Popis rozhraní

Na Obr. 3-45 je znázorněna konečná vizuální podoba uživatelského rozhraní v řídicím PC pro úlohu „Tvorba slov“ včetně vysvětlivek. Při tvorbě grafické stránky byly kladeny zvýšené požadavky na vizuální atraktivitu, přehlednost a minimum ovládacích prvků.



Obr. 3-45: Uživatelské prostředí

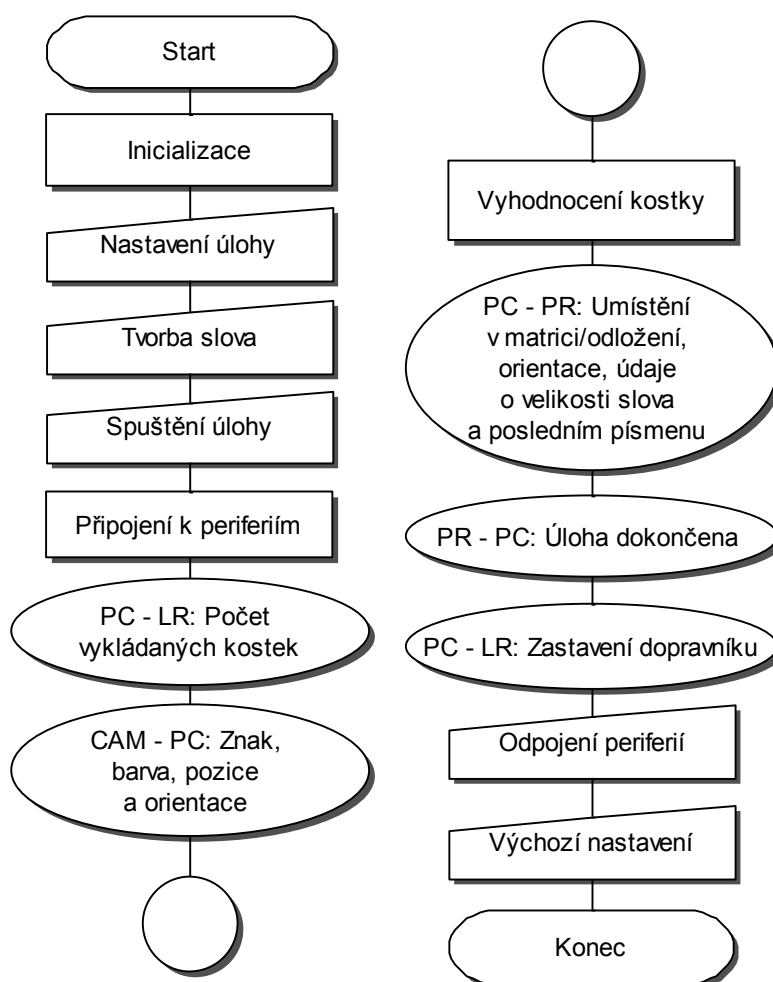
Po startu programu je zapotřebí:

- vyplnit čísla COM portů (výchozí nastavení na str . 105)
- v případě krátkého slova deaktivovat zvolené pozice
- provést zadání znaků slova a případně výběr barev
- vyhledat vyhovující kostky a vložit do matrice (pro snazší nalezení možno využít rozbalovacích menu „*Použitelné kostky*“)
- nastavit počet kostek vyložených z matrice
- spustit program tlačítkem „*Připoj*“

Po startu programu se zablokují všechna uživatelsky definovatelná pole, menu a tlačítka. To neplatí pro tlačítko „*Připoj*“, které se změní na „*Odpoj*“ pro uzavření síťové komunikace. Pro správnou funkci je nezbytné toto tlačítko stisknout až po skončení úlohy.

3.6.3 Struktura programu

Podobně jako u většiny programů v C# je i HMI složeno z definic globálních proměnných a metod, které je využívají a modifikují. Většina z těchto metod bude v následujících podkapitolách popsána nebo zmíněna ve vývojových diagramech. Základní činnosti programu jsou shrnuty na Obr. 3-46.



Obr. 3-46: Vývojový diagram popisující průběh programu

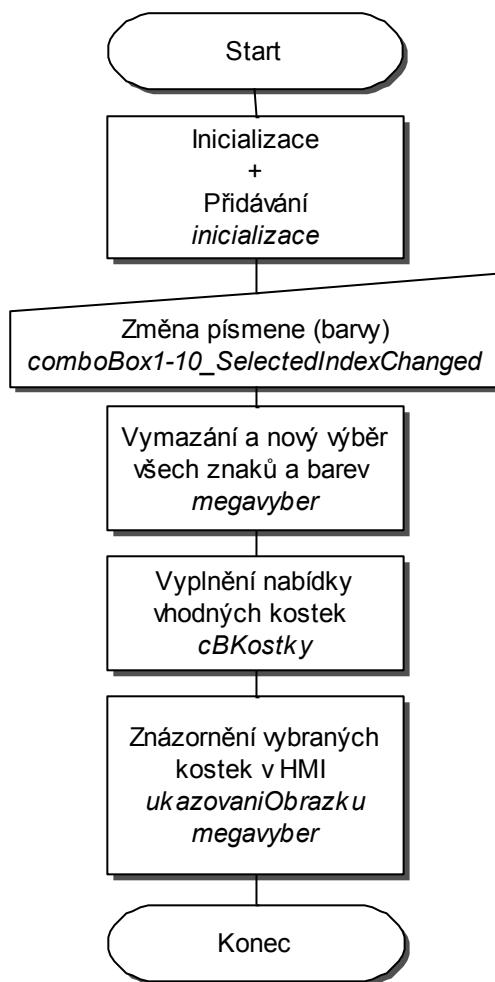
3.6.4 Kontrola výběru kostek

Kontrola výběru kostek spočívá ve vytvoření vnitřní databáze kostek a následným porovnáváním vybraných znaků a barev s touto databází. Přestože se zdá, že je problém jednoduchý, je zapotřebí si uvědomit, kolik kombinací při výběru může nastat. V programu jsou ošetřeny tyto kombinace, v nichž dochází k nutnosti oddělit kostku (skupinu kostek) od databáze použitelných kostek:

- výběr unikátního znaku/barvy (znak/barva je v databázi použitelných kostek pouze jednou)
- počet vybraných znaků/barev = počet znaků/barev v databázi použitelných kostek
- počet vybraných kombinací znaků a barev = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek
- počet vylučujících se dvojic kostek s vybranou kombinací znaku a barvy = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek (např. v pracovní databázi se vyskytují 2x písmena „A“ a „B“, avšak jsou na 2 žlutých kostkách obsahujících zároveň znaky „A“ a „B“ – tzn. nelze například složit slovo „ABB“ tvořené žlutými kostkami)
- počet vylučujících se trojic kostek s vybranou kombinací znaku a barvy = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek
- počet vylučujících se čtveřic kostek s vybranou kombinací znaku a barvy = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek (pro pětipísmenné slovo je zapotřebí provádět jak kontrolu dvojic, tak i trojic a čtveřic, protože pro tyto případy platí stejný princip, pětice se kontrolovat nemusí, protože po výběru pátého písmene je slovo kompletní a další výběr se odehrávat nebude)
- počet vylučujících se dvojic kostek s vybraným znakem/barvou = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek
- počet vylučujících se trojic kostek s vybraným znakem/barvou = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek
- počet vylučujících se čtveřic kostek s vybraným znakem/barvou = počet těchto kombinací v databázi použitelných kostek

Jak vyplývá z uvedených kombinací, jedná se o úlohu značně náročnou a komplexní. Mnoho z těchto kombinací bylo zjištěno empiricky při vývoji programu. Kontroly dvojic, trojic a čtveřic vyžadují tvorbu kombinací bez opakování z jednotlivých zvolených kombinací znaků a barev nebo pouze znaků a barev. Pro tvorbu kombinací byla využita volně dostupná knihovna „Combinations“ kanadského vývojáře Hawk777 [20].

Kontrola výběru kostek zabírá svým rozsahem přibližně 85% celkového zdrojového kódu HMI. Je proto logické, že k tomuto účelu je použito více metod v programu. Základní princip kontroly znaků je znázorněn na Obr. 3-47. Názvy jednotlivých metod programu jsou ve vývojovém diagramu označeny kurzívou.

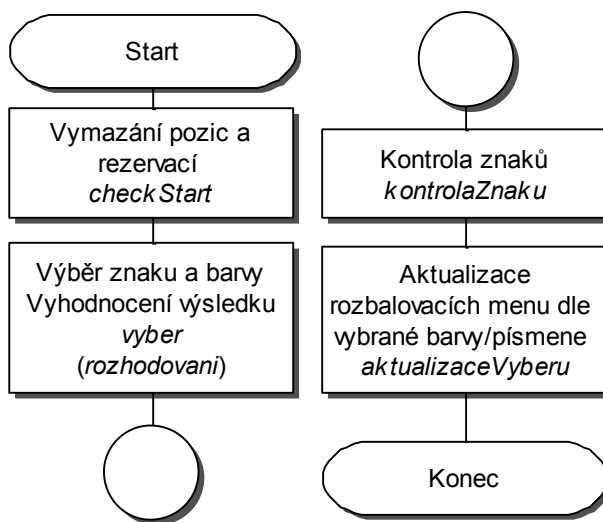


Obr. 3-47: Proces výběru kostek

Jak je patrné, vždy po zvolení znaku nebo barvy se do paměti uloží aktuální stav, tabulka se vynuluje a postupuje se od začátku. Toto řešení nahradilo složité způsoby zpětného odebrání kostek z pozic a databází v důsledku posledního výběru. V závěru se vyplní rozbalovací menu s nabídkou vhodných kostek a na obrazovce se zobrazí ilustrační obrázek kostky obsahující zvolený znak a barvu.

Rozebere-li se případ podrobněji, tak v případě, že byl zvolen nový znak či barva, se spustí metoda „megavyber“, jejíž součástí je také postupné zvolení znaků a barev na jednotlivé pozice. Pro tyto účely je volána metoda „Start“, jejíž vývojový diagram je na Obr. 3-48.

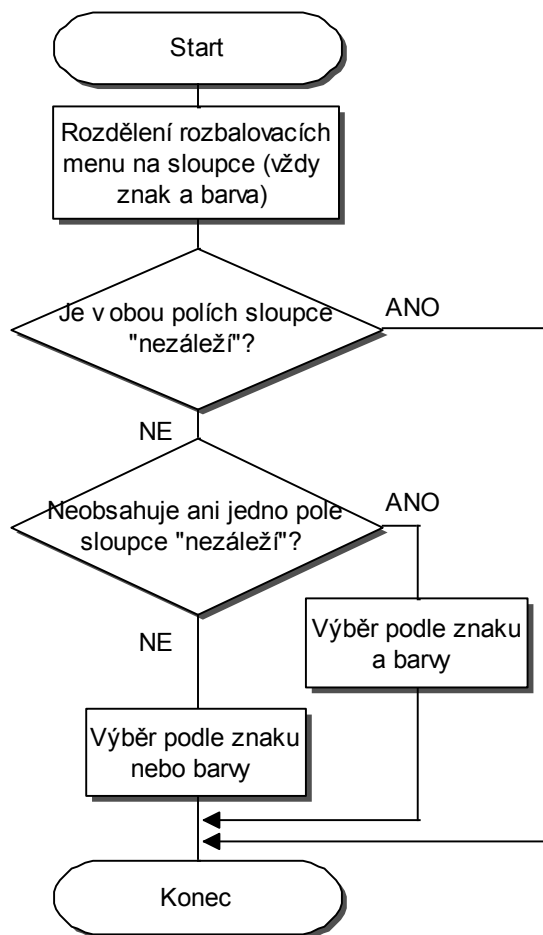
Na začátku je volána metoda „checkStart“, která označí sloupec, ve kterém se provádí změna a zruší zde předchozí záznamy (v případě, že bylo nutno kostku vyjmout z pracovní databáze, byla umístěna na pozici, z níž je nyní přesunuta zpět do databáze; ve všech případech je pak vynulovaný řádek rezervační matice).



Obr. 3-48: Vývojový diagram metody "Start"

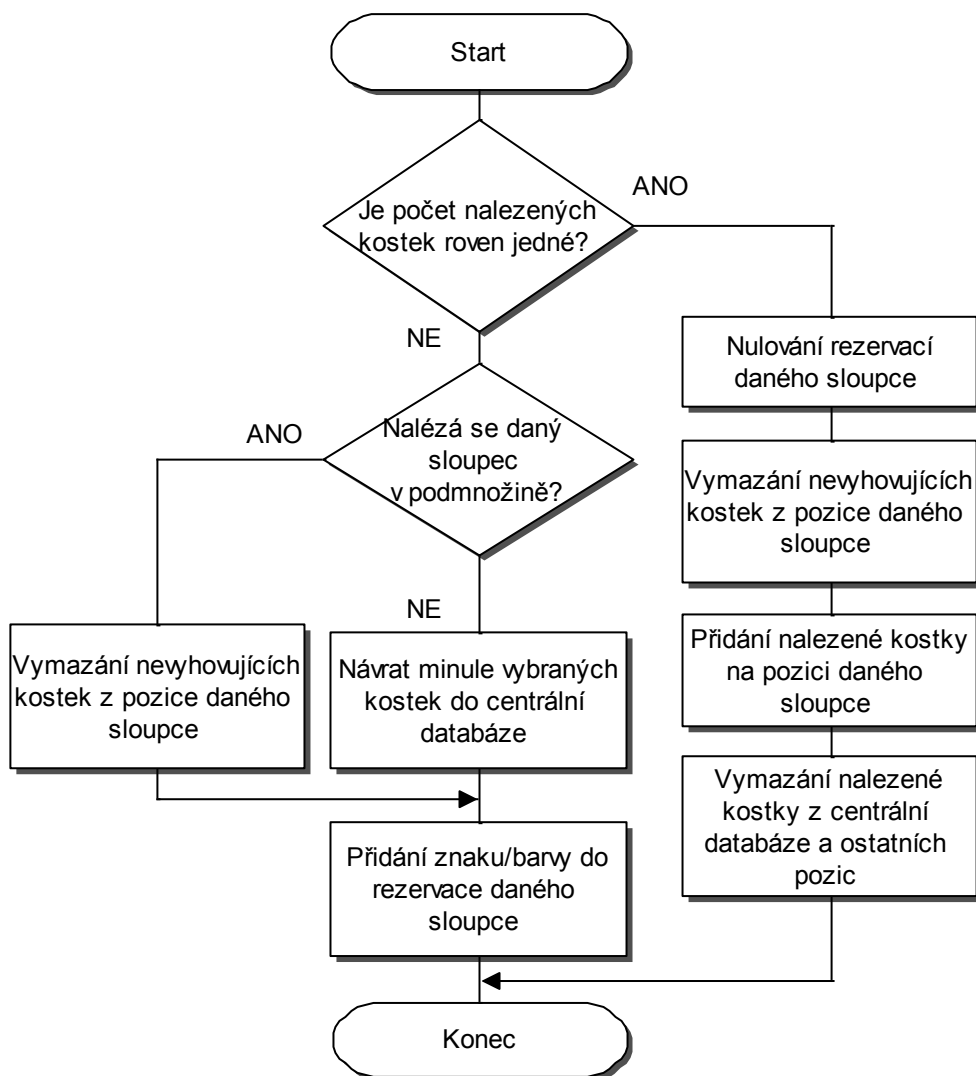
Výběr jeho vyhodnocení

Samotný princip výběru je poměrně jednoduchý a spočívá v prohledání pracovní databáze (všechny kostky, které lze aktuálně použít) za účelem nalezení vybraného znaku, barvy, případně jejich kombinace. Vše se děje v metodě „Vyber“, jejíž vývojový diagram je na Obr. 3-49.



Obr. 3-49: Vývojový diagram metody "Vyber"

Následně je volána metoda „*Rozhodovani*“, která vyhodnotí nalezené údaje a podle toho, zdali byl nalezen unikátní znak, odebere kostku z pracovní databáze a umístí ji na konkrétní pozici. Pokud je výsledků více, provede se rezervace vybraného znaku zápisem do příslušného řádku rezervační matice. Vývojový diagram je znázorněno na Obr. 3-50.



Obr. 3-50: Vývojový diagram metody "Rozhodovani"

Pozice

Jako pozice je v popisu programu označováno dynamicky měnící se pole obsahující kostky, jež byly vyjmuty z pracovní databáze a dále mohou být použity pouze ve sloupcích, které tuto kostku obsahují. Z uvedeného vyplývá, že 1 kostka může být umístěna v pozicích více sloupců (např. když se na všech kostkách vyskytuje 2x písmeno „A“ a bylo vybráno slovo obsahující 2 písmena „A“, musí se kostky s tímto písmenem odebrat z pracovní databáze a jelikož není jednoznačné, která kostka přijde do jakého sloupce, musí se obě kostky umístit na pozice obou sloupců).

Rezervace

V případě, že není nutno kostku vyjmout z pracovní databáze (tzn. existuje dostatečná zásoba kostek s vybraným znakem/barvou/kombinací), musí se přesto nějak zaznamenat, co je na této pozici vybráno. To slouží pro účely budoucích výběrů a jejich vyhodnocení. V průběhu vývoje se ukázalo, že nepostačuje pouze zaznamenat pozici, barvu a znak, ale správná funkce vyžaduje také další údaje. Proto byla sestavena rezervační tabulka, čítající 5 řádků (každý řádek 1 sloupec) a 7 sloupců. Níže je uveden přehled popisující data v jednotlivých sloupcích:

1. Identifikátor – v případě, že je v metodě „kontrolaZnaku“ zjištěno, že některé kostky je zapotřebí vyřadit z kontrolní databáze jsou přidány na pozice vybraných sloupců a do rezervační tabulky je vygenerován identifikátor, označující tuto množinu. Pokud je v dané množině schopnost dalšího výběru (např. v množině vybraných kostek podle znaku „A“ lze vybírat ještě jejich barvu), je identifikátor jednociferný. Pokud byly kostky z databáze vyjmuty podle znaku i barvy, je identifikátor dvouciferný.
2. Vybraný znak.
3. Vybraná barva.
4. Blokace znak 1 – v případě, že metoda „kontrolaZnaku“ zjistila, že je zapotřebí vyjmout nějaké kostky z pracovní databáze, obsahují poslední sloupce znaky a barvy, podle kterých bylo dané zjištění učiněno.
5. Blokace barva 1.
6. Blokace znak 2 (pro některé případy, pro ostatní je hodnota pole 0).
7. Blokace barva 2 (pro některé případy, pro ostatní je hodnota pole 0).

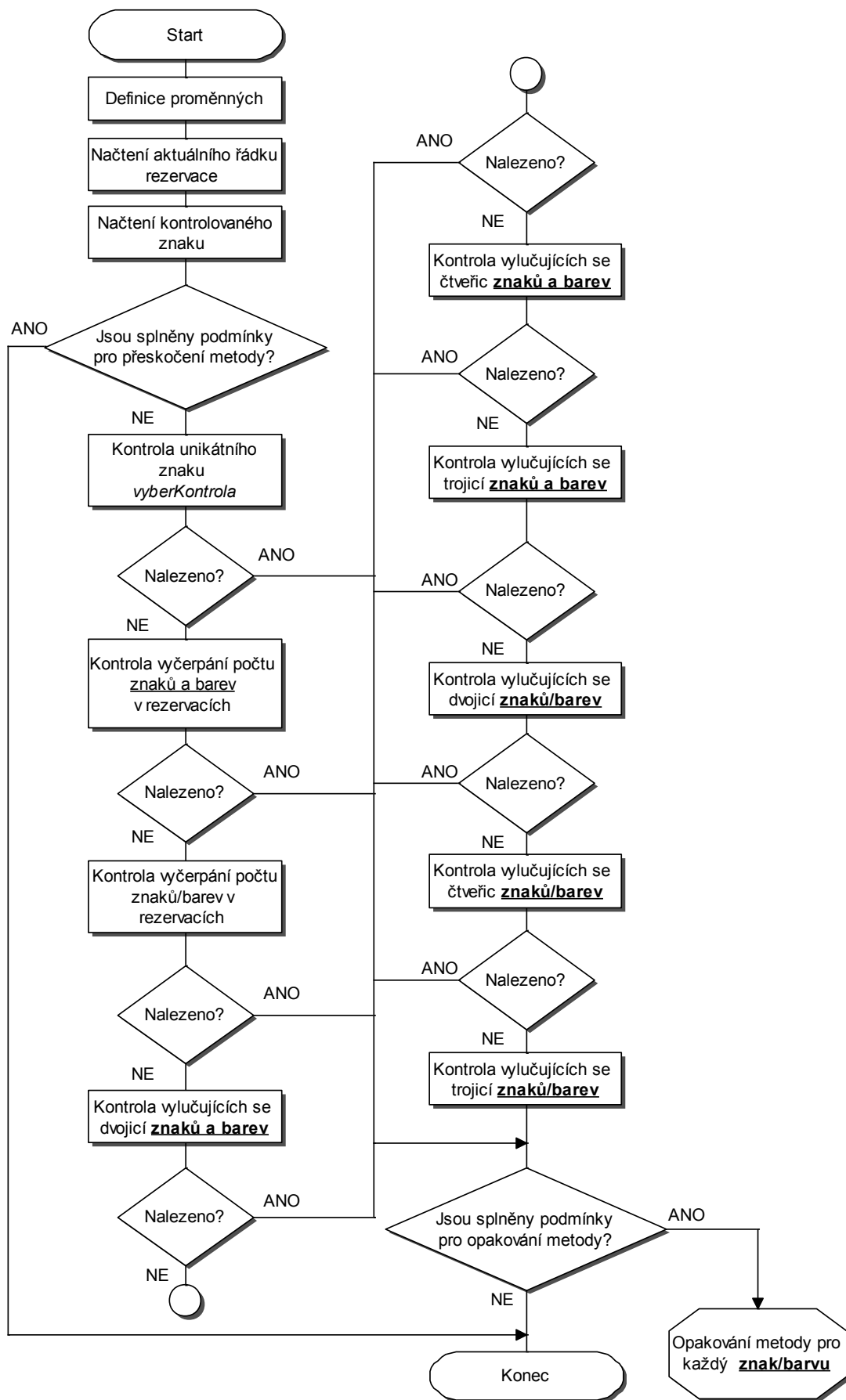
Kontrola znaků

Metoda „kontrolaZnaku“ je nejrozsáhlejší a jedna z nejdůležitějších metod volaných při kontrole výběru kostek. Je to dáno především tím, že se zde vyhodnocují téměř všechny případy popsané na str. 97. Činnosti vykonávané metodou jsou zobrazeny ve vývojovém diagramu na Obr. 3-51.

Za zdůraznění stojí skutečnost, že odebrání kostek z pracovní databáze může ovlivnit své okolí a zapříčinit tak řetězovou reakci, při které v důsledku odebrání kostek vyvstane potřeba dalšího odebrání díky ostatním rezervacím. Proto se v případě odebrání aktivuje logická proměnná, jež zapříčiní opakování celého postupu pro všechny znaky a barvy až do situace, kdy není odběr třeba.

Také si lze všimnout, že v případě odebrání kostek z kteréhokoli důvodu se ostatní možnosti přeskakují až k místu, kde dojde k opakování.

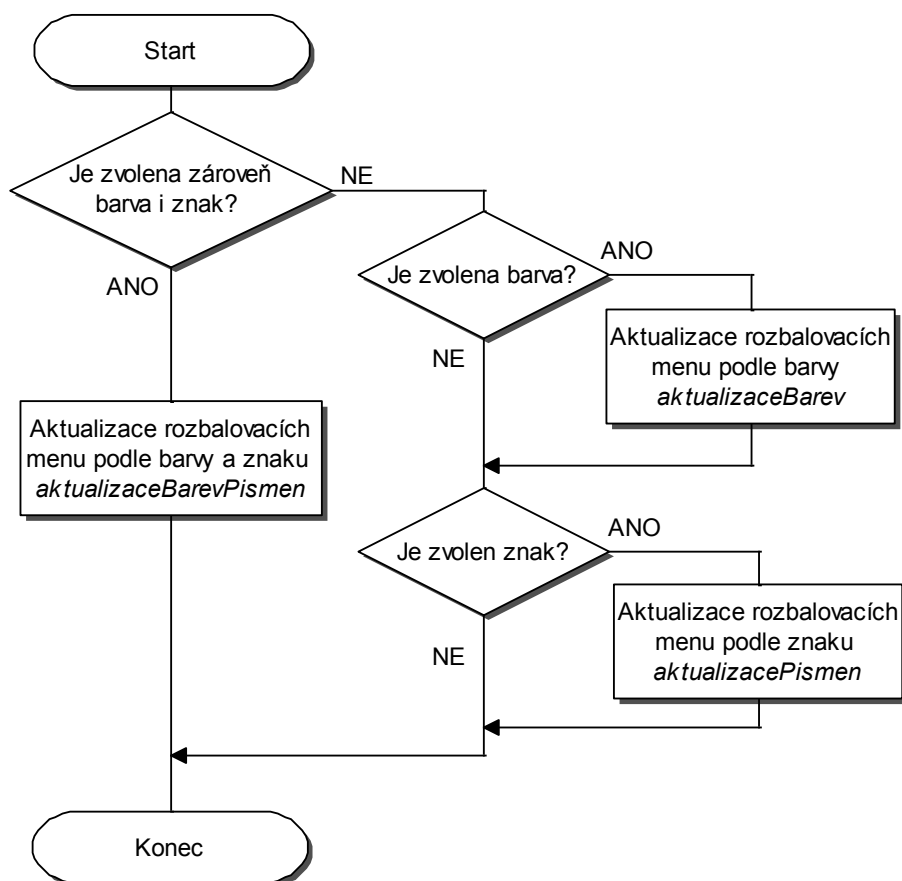
V případě, že uživateli nezáleží na znaku/barvě, popřípadě byl již proveden výběr přidávající dvouciferný identifikátor, je metoda pro daný výběr přeskočena.



Obr. 3-51: Vývojový diagram metody "kontrolaZnaku"

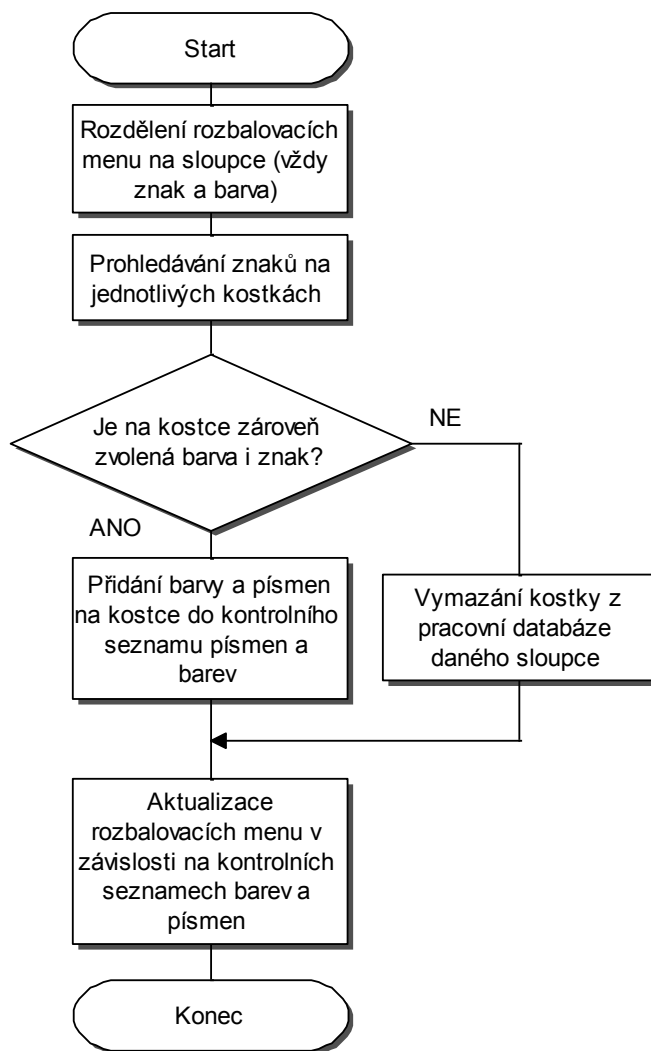
Aktualizace rozbalovacích menu

Po výběru, jeho vyhodnocení a úpravě pozic zbývá ještě aktualizovat rozbalovací menu podle vybraného znaku/barvy/kombinace. Ke jmenovanému účelu slouží metoda „*aktualizaceVyberu*“, jejíž vývojový diagram je znázorněn na Obr. 3-52. Hlavním účelem je rozhodnout, podle jakých kritérií se bude aktualizovat, a poté jsou volány příslušné metody.



Obr. 3-52: Vývojový diagram metody "aktualizaceVyberu"

Pro bližší popis se hodí metoda „*aktualizaceBarevPismen*“, která je sumou ostatních alternativ („*aktualizaceBarev*“ a „*aktualizacePismen*“). Vývojový diagram metody je na Obr. 3-53. Jak je vidět, je zde ze zmiňované pracovní databáze použitelných kostek proveden výtah použitelných kostek pro daný sloupec a podle něj se rozbalovací menu aktualizují.



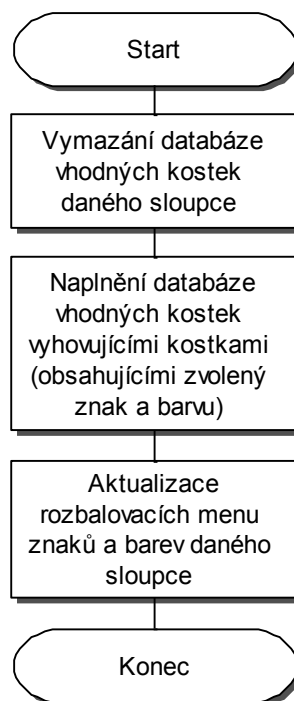
Obr. 3-53: Vývojový diagram metody "aktualizaceBarevPismen"

Aktualizace

Důležitou metodou je také „aktualizace“, kterou volá hned několik výše popsaných metod a jejím cílem je aktualizace pracovních databází použitelných kostek jednotlivých sloupců. To zajišťuje vždy relevantní data při výběrech a kontrolách. Vývojový diagram metody je na Obr. 3-54.

Pro zjednodušení práce jsou databáze napřed kompletně vymazány a znovu naplněny kostkami splňujícími aktuální podmínky.

Pracovní databáze použitelných kostek jednotlivých sloupců obsahují kostky jak z centrální databáze použitelných kostek, tak kostky z pozic daného sloupce.



Obr. 3-54: Vývojový diagram metody "aktualizace"

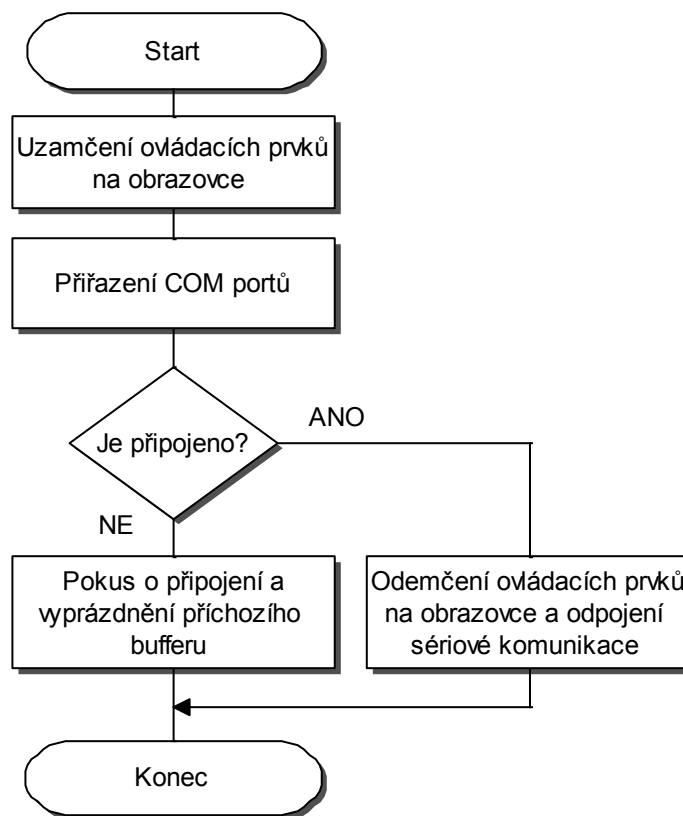
3.6.5 Komunikace s periferiemi

Nezbytnou úlohou uživatelského rozhraní je řízení demonstrační úlohy. Z toho plyne nutnost komunikovat s periferiemi a vyhodnocovat získaná data. HMI má definovány 3 sériové kanály – pro kameru, levý robot a pravý robot. Samo pak posílá informace oběma robotům, z pravého robotu a kamery pak informace přijímá. Pro přijetí informace je nutno každou zprávu zakončit příkazem nového řádku (/0A) a příkazem „carriage return“ (/0D). V Tab. 3-6 jsou zapsány aktuální názvy COM portů pro jednotlivé periferie.

Periferie:	COM port:
Kamera	COM6
Levý robot	COM3
Pravý robot	COM1

Tab. 3-6: Výchozí přiřazení COM portů

Připojení periferií je aktivováno uživatelem prostřednictvím tlačítka „Připoj“. Po připojení se uzamknou ovládací prvky a název tlačítka se změní na „Odpoj“, po jehož stisknutí dojde k uzavření sériových kanálů. Proces je také znázorněn ve vývojovém diagramu na Obr. 3-55. Při připojení program odešle levému robotu textovou zprávou číslo udávající počet kostek k vyložení + 10 pro zajištění dvouciferné hodnoty.



Obr. 3-55: Vývojový diagram procesu připojení periférií

Nejdůležitější informace, jakou program dostane, jsou ze systému strojového vidění. Příchozí textová zpráva je vhodně kódována tak, aby měla pokaždé stejnou velikost, a obsahuje:

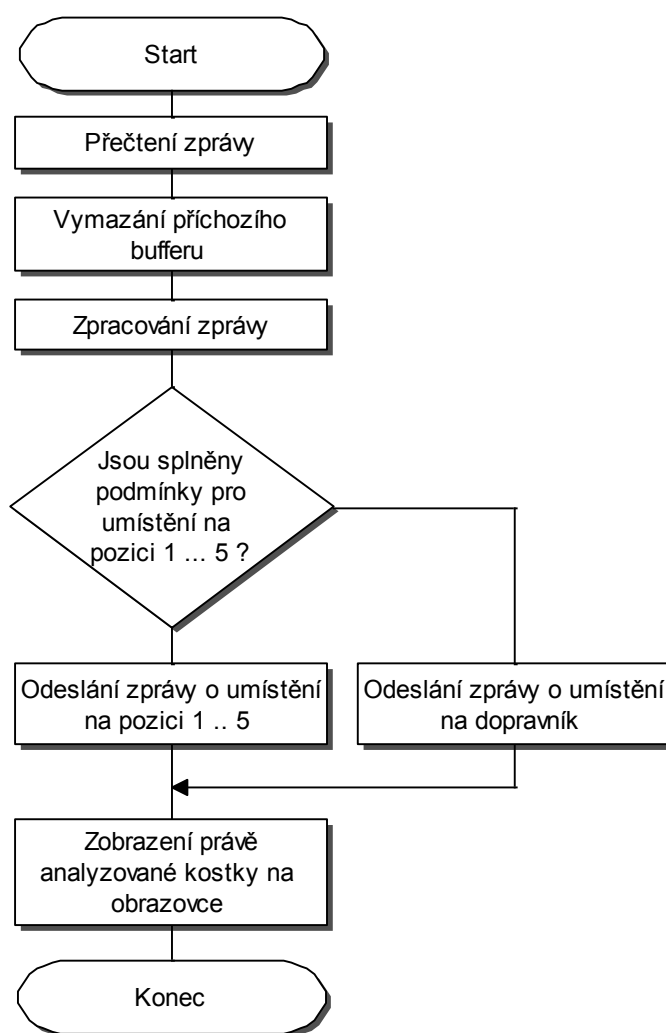
1. Údaj o rozpoznaném znaku.
2. Údaj o rozpoznané barvě.
3. Údaj o požadované poloze + 100 (pro trojčíferné číslo) – stovky.
4. Údaj o požadované poloze + 100 (pro trojčíferné číslo) – desítky.
5. Údaj o požadované poloze + 100 (pro trojčíferné číslo) – jednotky.
6. Údaj o požadované orientaci + 100 (pro trojčíferné číslo) – stovky.
7. Údaj o požadované orientaci + 100 (pro trojčíferné číslo) – desítky.
8. Údaj o požadované orientaci + 100 (pro trojčíferné číslo) – jednotky.

Z příchozí informace algoritmus vyhodnotí, jestli je daná kostka použitelná pro tvorbu slova nebo se má odložit na dopravník a podle toho odešle pravému robotu zprávu ve tvaru:

1. Pozice (1-5 pozice ve slově, 6 odložení na dopravník).
2. Orientace + 100 (pro trojčíferné číslo) – stovky.
3. Orientace + 100 (pro trojčíferné číslo) – desítky.
4. Orientace + 100 (pro trojčíferné číslo) – jednotky.
5. Poloha + 100 (pro trojčíferné číslo) – stovky.
6. Poloha + 100 (pro trojčíferné číslo) – desítky.

7. Poloha + 100 (pro trojčíferné číslo) – jednotky.
8. Obsazení 1. pozice (1 obsazeno, 0 neobsazeno).
9. Obsazení 2. pozice (1 obsazeno, 0 neobsazeno).
10. Obsazení 3. pozice (1 obsazeno, 0 neobsazeno).
11. Obsazení 4. pozice (1 obsazeno, 0 neobsazeno).
12. Obsazení 5. pozice (1 obsazeno, 0 neobsazeno).
13. Poslední znak (1 jedná se o poslední vykládaný znak, 0 nejedná se o poslední vykládaný znak).

Vyhodnocení zprávy ze systému strojového vidění je znázorněno ve vývojovém diagramu na Obr. 3-56. Tato akce je naprogramována jako přerušení programu – v okamžiku přijetí zprávy se automaticky přeruší dosavadní činnost a program se začne zabývat vyhodnocením zprávy.

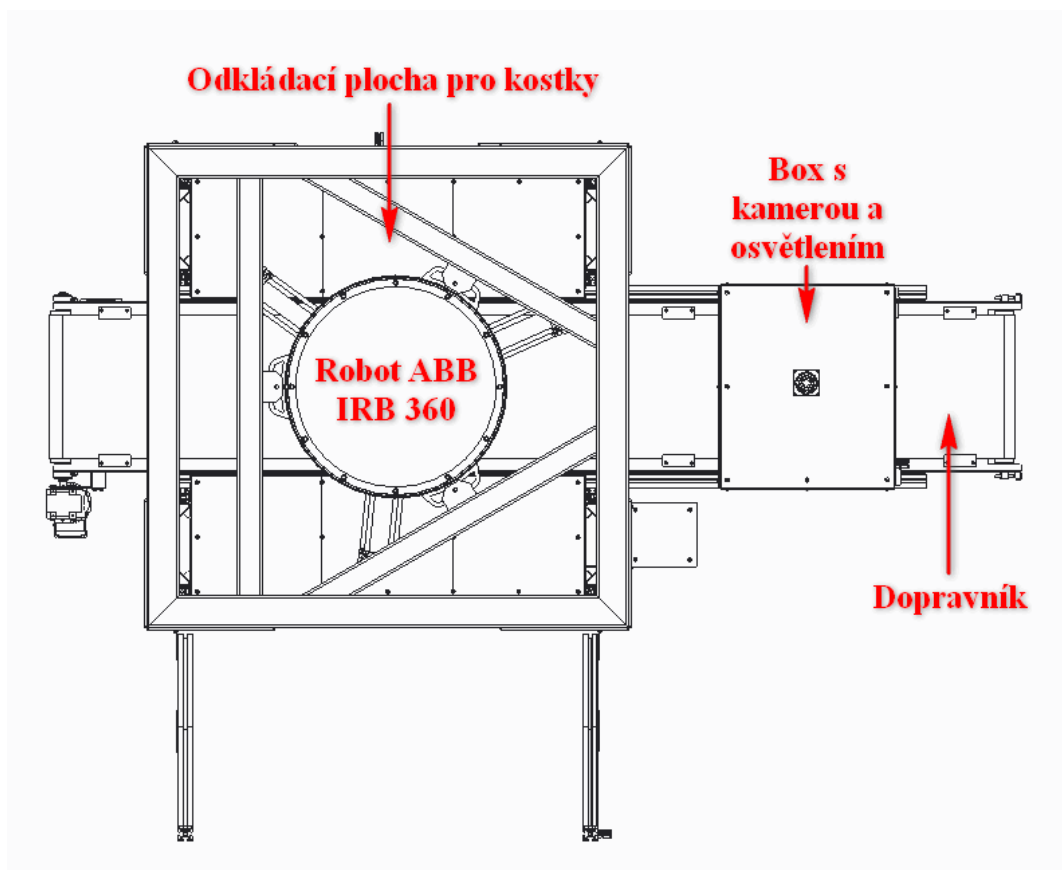


Obr. 3-56: Vývojový diagram vyhodnocení zprávy

Poslední činností uživatelského rozhraní je přeposlání zprávy o dokončení úlohy z pravého robotu do levého robotu. Odesílá se textová zpráva ve tvaru 99 (hodnota nemá zvláštní význam). Účelem je zastavení dopravníku a ukončení programu levého robotu.

4 Demonstrační úloha na pracovišti ABB IRB 360

Pro demonstraci běžného použití robotů s paralelní strukturou byla vybrána úloha „Třídění kostek“, jež tematicky navazuje na úlohu prováděnou na pracovišti ABB IRB 140, neboť jsou jako objekt manipulace použity stejné dřevěné kostky s písmeny. V úloze „Třídění kostek“ budou kostky rozpoznávány systémem strojového vidění a ukládány na odkládací plochu podle barvy tak, aby vzniklo definované balení, což připomíná reálné použití v průmyslu. Schéma pracoviště s popisy důležitých prvků je na Obr. 4-1. Dispoziční schéma pracoviště je v příloze C. Videoukázka zpracované úlohy je k dispozici v multimediální příloze.



Obr. 4-1: Schéma pracoviště ABB IRB 360

4.1 Box s kamerou a osvětlením

V rámci úprav nově pořízeného pracoviště byl Bc. Martinem Soukupem navržen kamerový box složený z rámové stavebnice Bosch a stěn z 4 mm pěněného PVC. Kamerový box pomáhá odrážet světelné paprsky vyzařované osvětlovacím systémem a rovněž izoluje světelné podmínky uvnitř boxu (zamezuje vnějším světelným paprskům pronikat do prostoru uvnitř boxu a osvětlovat objekty). Sestavený box je znázorněn na Obr. 4-2.



Obr. 4-2: Box s kamerou a osvětlením

Do hotového boxu bylo zapotřebí navrhnout a vyrobit vhodné osvětlení. Dostupným světelným zdrojem byl LED pásek vybraný Bc. Martinem Soukupem popsáný na str. 70. Z tohoto pásku a jeho příslušenství (profil z hliníkové slitiny a difuzor) bylo vyrobeno 8 světelných modulů tak, aby pasovaly do vyrobeného boxu. Hotové moduly jsou znázorněny na Obr. 4-3.



Obr. 4-3: Osvětlovací moduly

Konce kabelů jsou opatřeny konektory, jež se musí zapojit do rozvodné skřínky, která k tomu účelu byla vyrobena. Skříňka disponuje vstupy pro napájecí napětí a ovládací potenciometr chladicího ventilátoru umístěného na stropě boxu a výstupy pro napájení 8 světelných modulů a chladicího ventilátoru. Schéma zapojení rozvodné skřínky, zobrazené společně s průmyslovou kamerou na Obr. 4-4 je v příloze D.



Obr. 4-4: Rozvodná skříňka osvětlení

Napájení je do skřínky přivedeno z dodaného 70W adaptéru přes vypínač. V praxi se ukázalo, že se vnitřní prostor boxu v zapnutém stavu nezahřívá a tudíž nebyl zapojen potenciometr s chladicím ventilátorem.

Při funkčních zkouškách byla nalezena vhodná poloha osvětlovacích modulů pro dobré výsledky obrazové analýzy. Výsledný stav kamerového boxu, včetně příslušenství, je na Obr. 4-5.



Obr. 4-5: Osvětlení v provozu

4.2 Robot ABB IRB 360

Robot ABB IRB 360 se vyznačuje paralelní strukturou a čtyřmi stupni volnosti. Pohonné jednotky a veškerá elektronika je zabudována do zavěšené základny robotu. Proto nemusí být ramena robustní (naopak jsou vyrobena z uhlíkových kompozitů) a díky nízké hmotnosti se mohou pohybovat velice rychle, což je předností těchto robotů. Robot je vyobrazen na Obr. 4-6.



Obr. 4-6: Robot ABB IRB 360 [10]

4.2.1 Efektor s přísavkou

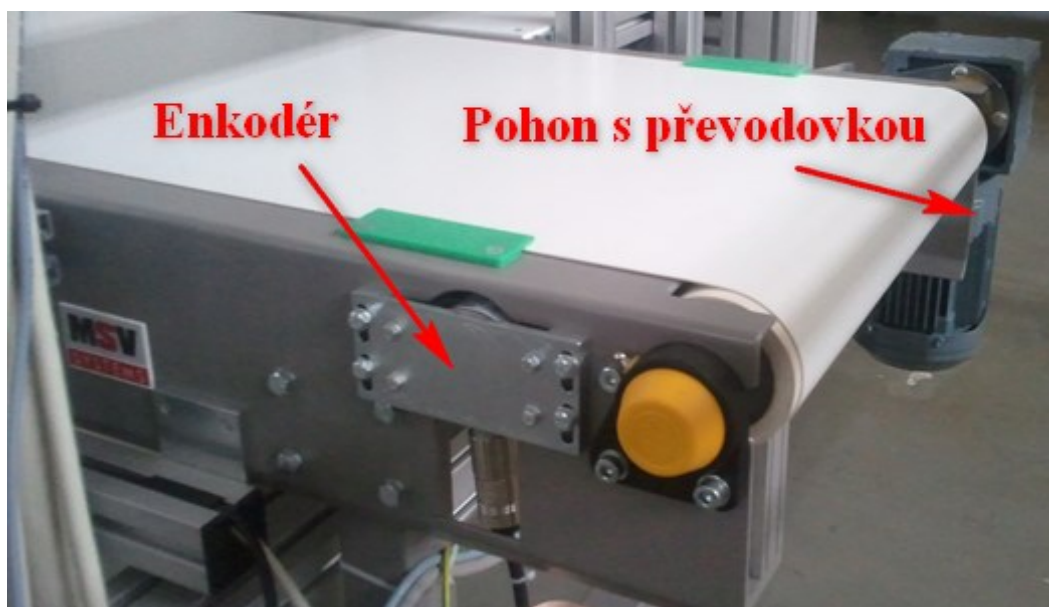
Robot byl dodán s jednoduchým aktivním pneumatickým efektem s vyměnitelnou přísavkou. Efektor se vyznačuje nízkou hmotností a malými rozměry a je vhodný pro uchopování drobných předmětů. Podtlak je přiváděn hadicí z robotu, kde je umístěn ejektor. Pracovní efektor je na Obr. 4-7.



Obr. 4-7: Efektor s přísavkou

4.3 Pásový dopravník

Pásový dopravník firmy MSV Systems zajišťuje spojení mezi systémem strojového vidění a robotem. Řídicí jednotka robotu je vybavena modulem ABB Conveyor Tracking, který přijímá signály z inkrementálního enkodéru umístěného na dopravníku (viz Obr. 4-8). Součástí programu jsou knihovny, které synchronizují robot s dopravníkem. V praxi tak může robot za jízdy odebírat objekty manipulace. V případě, že je na dopravníku více objektů a robot je nestíhá odebírat, je schopen zastavit dopravník dříve, než se nejvzdálenější objekt dostane z jeho dosahu, odebrat skupinu objektů a dopravník opět aktivovat.

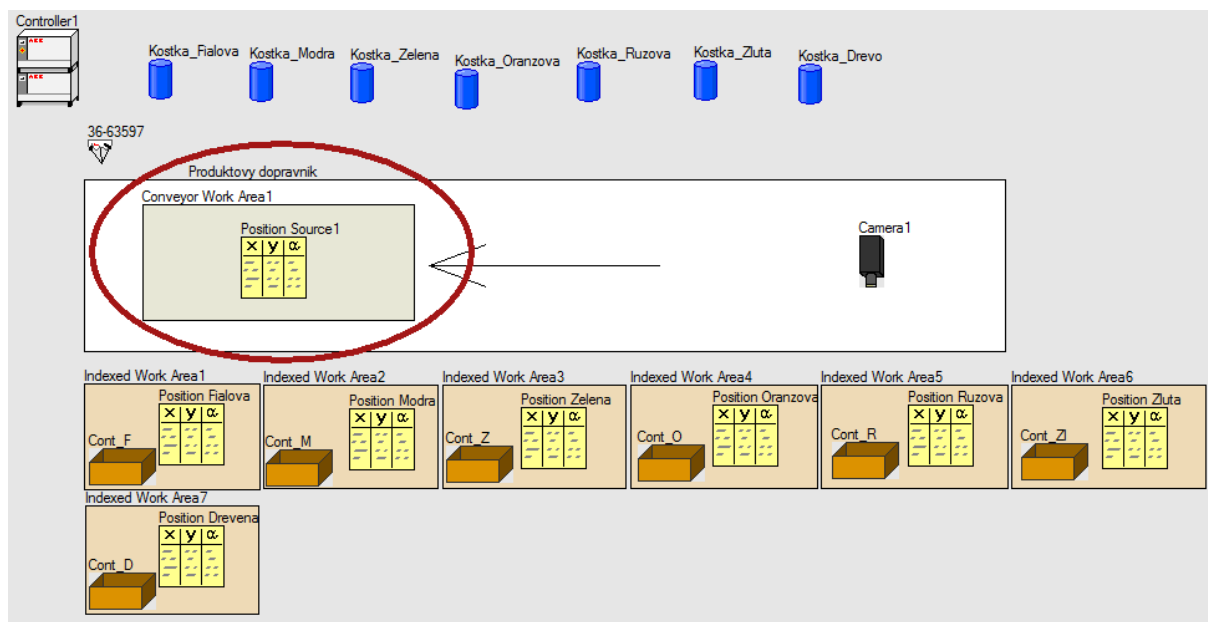


Obr. 4-8: Detail pásového dopravníku

4.4 Programování robotizovaného pracoviště

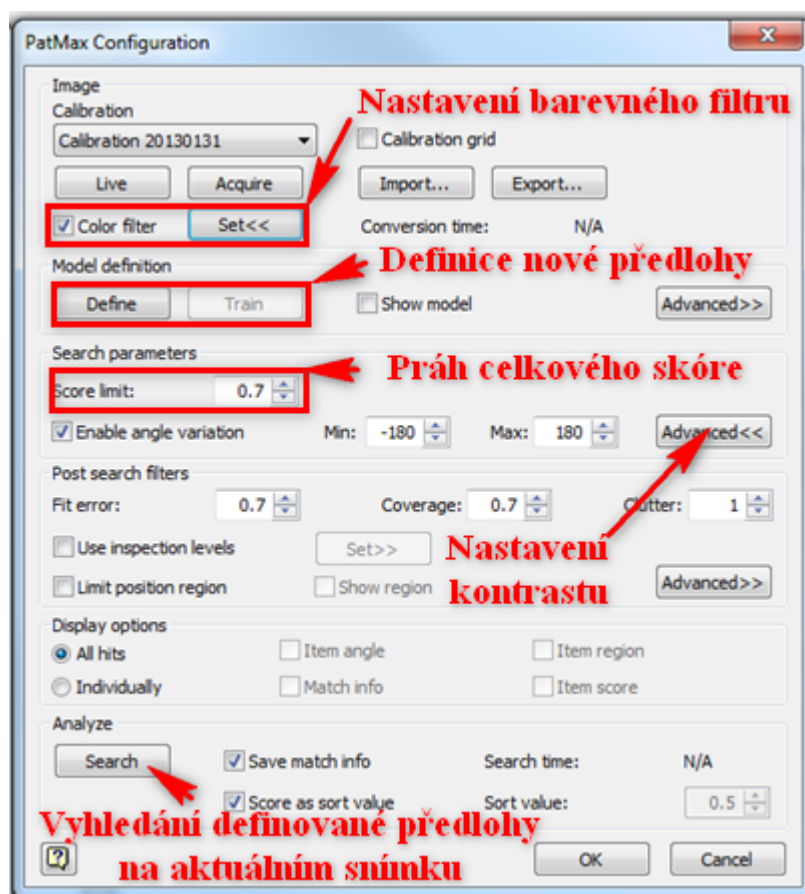
Veškeré standardní úlohy se na pracovišti ABB IRB 360 tvoří v softwarovém prostředí ABB Pick Master 3. Nejprve je zapotřebí definovat prvky pracoviště („New Line“) – zde je zapotřebí nastavit robot, kameru i dopravník. Prostřednictvím kódu Rapid se v souřadnicích workobjectu „wobj0“ definují odkládací plochy („Indexed Work Area“). Pro potřeby úlohy „Třídění kostek“ byla pro každou barvu definována samostatná odkládací plocha.

Po úvodním nastavení se vytvoří nová úloha („New Project“), kde je zapotřebí vytvořit jednotlivé objekty včetně tvorby předlohy pro strojové vidění a nastavit chování robotu k jednotlivým součástem. Na Obr. 4-9 je k vidění úloha „Třídění kostek“ z pohledu softwaru ABB Pick Master 3. Modře jsou znázorněny jednotlivé barevné skupiny kostek s jejich rozměry. Na dopravníku se nalézá tzv. „Position Source 1“, kde jsou obsaženy předlohy pro strojové vidění a je zde uvedeno, co má robot s daným objektem udělat (nechat projet/zvednout z dopravníku). V případě spolupráce více robotů lze zde nastavit strategie odběru. Ve spodní části obrázku jsou umístěny jednotlivé odkládací plochy, obsahující údaje o umístění kostek a vzorcích ukládání.



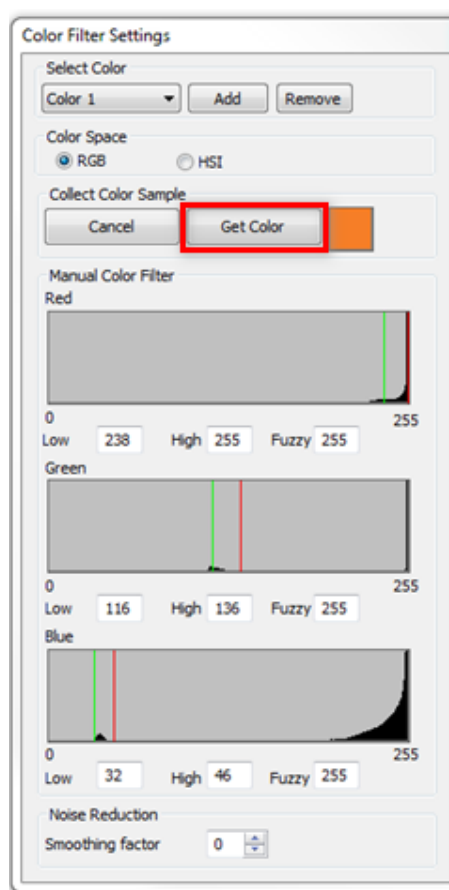
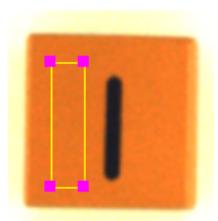
Obr. 4-9: Demonstrační úloha "Třídění kostek" v prostředí ABB Pick Master

Po vytvoření nové skupiny kostek je nezbytné jí přiřadit předlohu („Model“) v systému strojového vidění. Pro definici předlohy byla použita funkce „PatMax Geometric Model“, představující algoritmus pro vyhledávání vzorů na základě reprezentací prvků. Základní okno definice předlohy je na Obr. 4-10.



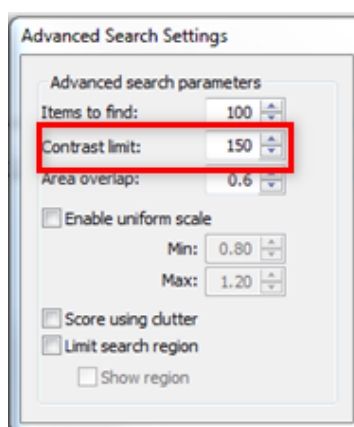
Obr. 4-10: Definice předlohy funkce "PatMax Geometric Model"

Pro rozlišování barev je výhodné aplikovat na snímek barevný filtr a kostky rozlišovat podle kontrastu. Definice barevného filtru, znázorněná na Obr. 4-11, je poměrně jednoduchá a intuitivní. Na snímku se označí oblast pokryta filtrovanou barvou a v okně „Color Filter Settings“ se výběr potvrdí volbou „Get Color“. Vše ostatní je zajištěno automaticky.



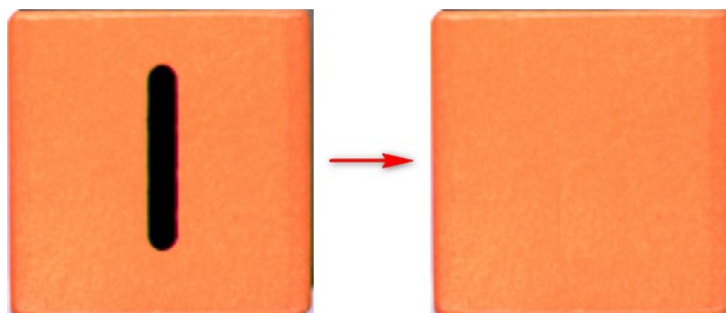
Obr. 4-11: Aplikace barevného filtru

Pro správné výsledky je zapotřebí nastavit hodnoty prahů celkového skóre, kontrastu (znázorněno na Obr. 4-12) a eventuálních chyb tak, aby při dlouhodobém provozu byly výsledky analýzy spolehlivé. Toho bylo dosaženo zkušebním provozem a průběžnou úpravou hodnot.



Obr. 4-12: Nastavení kontrastního limitu

Jelikož bude systém strojového vidění rozlišovat kostky pouze podle barvy, musí být základní předloha upravena tak, aby neobsahovala žádné písmeno. Toho bylo dosaženo exportem pořízeného snímku a jeho úpravě v grafickém editoru. Na Obr. 4-13 je znázorněna řečená úprava. Upravený snímek byl do prostředí znovu importován a definovaný model byl uložen. Pro každou barevnou skupinu byl postup identický, avšak hodnoty jednotlivých prahů odlišné.



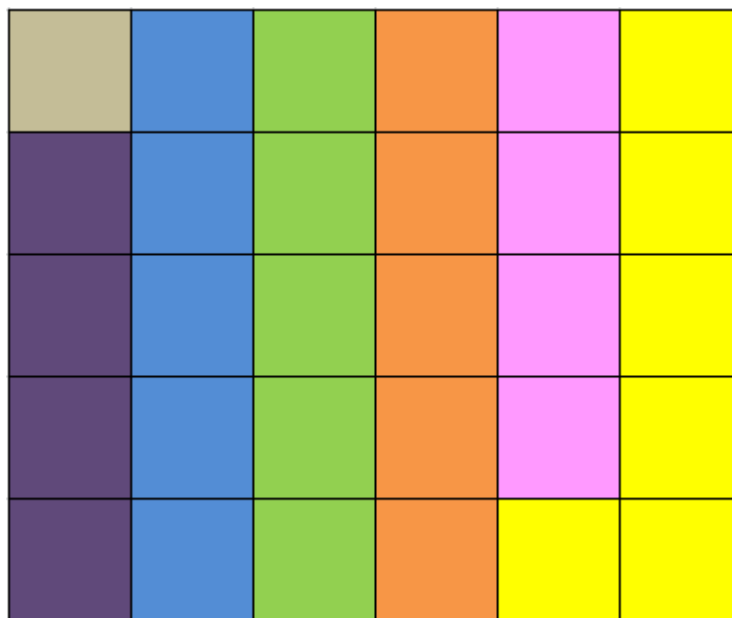
Obr. 4-13: Úprava pořízeného snímku

Do zdrojového kódu v jazyce Rapid (vytvořený aplikací Pick Master) bylo nutno pro odkládání na více míst vložit do procedury „PickPlaceSeq“ kód zobrazený na Obr. 4-14.

```
PROC PickPlaceSeq()
  Pick PickIndex{1};
  IF PickTarget.Type=1 THEN
    Place PlaceIndex{1};
  ELSEIF PickTarget.Type=2 THEN
    Place PlaceIndex{2};
  ELSEIF PickTarget.Type=3 THEN
    Place PlaceIndex{3};
  ELSEIF PickTarget.Type=4 THEN
    Place PlaceIndex{4};
  ELSEIF PickTarget.Type=5 THEN
    Place PlaceIndex{5};
  ELSEIF PickTarget.Type=6 THEN
    Place PlaceIndex{6};
  ELSEIF PickTarget.Type=7 THEN
    Place PlaceIndex{7};
  ENDIF
ENDPROC
```

Obr. 4-14: Úprava kódu Rapid

Jednotlivé skládací vzory a odkládací plochy jsou definovány tak, aby tvořily definované balení barevných kostek zobrazené na Obr. 4-15.



Obr. 4-15: Uspořádání kostek v balení

5 Závěr

Pro poznání současného stavu techniky byla provedena rozsáhlá rešerše o dostupných kamerových systémech, jejich hardwarových možnostech a programování. Rovněž byla věnována pozornost různým sběrným průmyslových kamer a byly popsány jejich výhody a nevýhody.

V současné době Katedra robototechniky disponuje dvěma systémy strojového vidění, jež jsou součástí výukových pracovišť s roboty ABB IRB 140 a robotem ABB IRB 360 v laboratoři Centra robotiky. Všechny prvky systémů strojového vidění jsou v textu popsány.

Na pracovišti s roboty ABB IRB 140 byla navržena a realizována demonstrační úloha „Tvorba slov“, při níž uživatel volí slovo o velikosti max. 5 písmen a aktivuje program. Levý robot začne vykládat kostky ze zásobníku na dopravník. Systém strojového vidění rozpozná znak a barvu na kostce a řídicí program výsledek vyhodnotí. Výsledek je odeslán pravému robotu, který kostku umístí na správnou pozici ve slově nebo ji znovu položí na dopravník. Při řešení úlohy nastaly potíže s kompaktním vyhodnocovacím systémem kamery, který hlásil nedostatek paměti. Proto musel být použit algoritmus vyhledávání znaků s nižší hardwarovou náročností. Nevýhodou však je nemožnost rozpoznat orientaci kostky (pro 3 znaky byla proto použita složitější metoda, jež uvedeným nedostatkem netrpí).

Možným řešením je pořízení nové vyhodnocovací jednotky, popř. PC systému disponujícím výkonnějším hardware. Rovněž by bylo pro účely výuky a demonstrace zajímavé pořídit profesionální sofistikovaný osvětlovací systém s polopropustnými zrcadly pro nasvětlení lesklých objektů.

Na pracovišti s robotem ABB IRB 360 byla navržena a realizována úloha „Třídění kostek“. Na pásový dopravník jsou kladeny barevné kostky s písmeny. Systém strojového vidění rozpoznává pozici, orientaci a barvu kostky. V závislosti na těchto údajích jsou robotem kostky odebírány a podle barvy pokládány na odkládací plochu. Při odkládání kostek docházelo k ne zcela přesné orientaci na odkládací ploše, jež byla zaviněna součtem dílčích nepřesností (kalibrace kamery, ruční nastavení středu uchopovaného objektu, rychlost robotu a pneumatické uchopování). Proto je vhodné při takové situaci kostky odkládat dále od sebe a dalším mechanismem kostky srovnat, popř. zvolit pomalejší rychlost a jinou strategii ukládání kostek.

6 Použité zdroje

1. BYRTUS, K. *Integrace strojového vidění do robotizovaného pracoviště: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Univerzitní studijní programy, Studijní program Mechatronika, 2012. 59 s. Vedoucí práce: Novák, P.
2. HAVLE, O. Strojové vidění II: Úlohy, nástroje a algoritmy. *Automa*. 2008, č. 2, s. 54–56.
3. HAVLE, O. Strojové vidění IV: Osvětlovače. *Automa*. 2008, č. 4, s. 47–49.
4. MŽIK, J. *Robotizované výukové pracoviště s robotem ABB IRB 360: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2013. 74 s. Vedoucí práce: Krys, V.
5. SKAŘUPA, J. *Průmyslové roboty a manipulátory*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. 260 s. ISBN: 978-80-248-1522-0.
6. SZCZEPONIEC, J. *Návrh a realizace výukové ho RTP pro PR ABB IRB 140 na UCR: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2010. 65 s. Vedoucí práce: Kárník, L.
7. TOMÁŠ, J. *Realizace efektoru s přísavkami pro PR ABB IRB 140: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2010. 62 s. Vedoucí práce: Krys, V.
8. *1.4/16mm - Security Systems - PENTAX RICOH IMAGING UK LTD* [online]. [cit.2013-01-19]. URL <http://www.pentax-security.com/en/product/FL-CC1614-2M/ssd_products_image_processing.php>.
9. *A20 Series - Smart cameras - Machine Vision | Datalogic Spa* [online]. [cit.2012-11-09]. URL <<http://www.datalogic.com/eng/products/industrial-automation/machine-vision/a20-series-pd-548.html>>.
10. *ABB Secures Agreement to Provide Robotic Automation to A123 Systems For Advanced Battery Applications – MFRTech* [online]. [cit.2013-05-10]. URL <<http://www.mfrtech.com/articles/3027.html>>.
11. *Application manual PickMaster 3.3* [online]. [cit.2013-05-04]. URL <http://lecture.sccsc.edu/amt/AMT%20206%20Electricity%20and%20Automation/ABB%20IRB%20140%20Robot/files/3HAC031978-001_revB_en.pdf>.
12. *AVT Prosilica GT Series GigE Cameras | Edmund Optics* [online]. [cit.2012-11-05]. URL <<http://www.edmundoptics.com/imaging/cameras/gigabit-ethernet-cameras/avt-prosilica-gt-series-gige-cameras/3583>>.
13. *Basler A601FC Color Machine Vision Camera* [online]. [cit.2013-02-12]. URL <<http://www.graftek.com/pages/A601fc.htm>>.
14. *Basler ace - Area Scan Cameras* [online]. [cit.2012-11-20]. URL <<http://www.baslerweb.com/products/ace.html>>.
15. *Basler scA1300-32gc Color High Resolution Machine Vision Camera* [online]. [cit.2013-04-09]. URL <<http://www.graftek.com/pages/scA1300-32gc.htm>>.
16. *Bumblebee ® 2 Stereo Vision System Price/Product List* [online]. [cit.2012-11-26]. URL <<http://yuriythebest.g0dsoft.com/Bumblebee2%20Price%20List%2008-18-06.pdf>>.
17. *BVS-Vision Sensor 1006 CZ* [online]. [cit.2012-10-14]. URL <http://www.balluff.cz/download/katalogy/BVS/BVS-Vision-Sensor_1006_CZ.pdf>.
18. *Cognex BGA Inspection | Computer Vision Systems* [online]. [cit.2012-12-03]. URL <<http://www.cognex.com/visionpro-machine-vision-software.aspx>>.
19. *Cognex Photo Electric Sensors | Industrial Sensors* [online]. [cit.2012-10-05]. URL <<http://www.cognex.com/industrial-sensor-checker.aspx>>.
20. *Combination Generator – CodeProject* [online]. [cit.2013-02-20]. URL <<http://www.codeproject.com/Articles/14417/Combination-Generator>>.

21. *Desky z pěněného PVC – Portaflex* [online]. [cit.2013-03-14]. URL <http://www.portaflex.cz/cz/produkty/materialy-pro-reklamu/art_32/desky-z-peneneho-pvc.aspx>.
22. *Eight Tips for Optimal Machine Vision Lighting* [online]. [cit.2013-01-10]. URL <http://files.microscan.com/_att/7e54b2b8-570c-4366-a740-5da5b0e5336c/lighting_tips_white_paper.pdf>.
23. *EOS-1200/M4G ADLINK Technology | Mouser* [online]. [cit.2012-12-26]. URL <<http://cz.mouser.com/ProductDetail/ADLINK-Technology/EOS-1200-M4G/?qs=sGAEpiMZZMsK5LjOSsCw1SwLK9%252bYti7Tf8I87jCIOaM=>>>.
24. *FireWire CCD Color Zoom Cameras* [online]. [cit.2012-11-05]. URL <http://www.theimagingsource.com/en_US/products/zoom-cameras/firewire-ccd-color/>.
25. *FQ Vision Sensor/Features | OMRON Industrial Automation* [online]. [cit.2012-11-07]. URL <<http://www.ia.omron.com/products/family/2956/>>.
26. *Fujinon CF125HA-1 1" 12.5mm Industrial Lens. B&H Photo Video* [online]. [cit.2012-12-26]. URL <http://www.bhphotovideo.com/c/product/404207-REG/Fujinon_CF125HA1_CF125HA_1_1_12_5mm_Industrial.html>.
27. *Fujinon HF16HA-1B 16mm f/1.4 2/3" Fixed Focal Lens* [online]. [cit.2013-01-21]. URL <http://www.bhphotovideo.com/c/product/404249-REG/Fujinon_HF16HA1B_HF16HA_1B_16_mm_F1_4.html>.
28. *Geographic Information Systems* [online]. [cit.2012-11-08]. URL <<http://ww2.ptgrey.com/gis-cameras>>.
29. *Identifying Frame Grabber Core Competencies >> Evaluation Engineering* [online]. [cit.2012-12-20]. URL <<http://www.evaluationengineering.com/articles/200512/identifying-frame-grabber-core-competencies.php>>.
30. *In-Sight® Micro Series Vision System: Installation Manual* [online]. [cit.2012-11-20]. URL <<http://www.automationsystemsandcontrols.net.au/PDF%27s%20Cognex/In-Sight%20Micro%20Series%20Vision%20System%20Installation%20Manual.pdf>>.
31. *Intel Pro/1000 PT Dual Port Server Adapter - bulk EXPI9402PTBLK | CZC.cz* [online]. [cit.2012-12-18]. URL <<http://www.czc.cz/intel-pro-1000-pt-dual-port-server-adapter-bulk/116577/produkt>>.
32. *iVu Integrated Vision Sensors* [online]. [cit.2012-10-25]. URL <<http://www.bannerengineering.com/en-US/products/sub/538>>.
33. *LED pásek Premium Line 5630 60LED/m, 5m, studená bílá, 12V* [online]. [cit.2012-11-10]. URL <http://www.iwd.cz/led-pasek-premium-line-5630-60led-m-5m-studena-bila-12v_d12496.html>.
34. *Light Color vs. Work sample Color | Technical Guide | Machine Vision Applications | Products & Service | CCS INC* [online]. [cit.2013-02-15]. URL <http://www.ccs-grp.com/s2_ps/s1/s_04/s_02.html>.
35. *Machine Vision > Smart Cameras - National Instruments* [online]. [cit.2012-11-06]. URL <<http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/vision/lang/cs/pg/1/sn/n17:vision,n21:11601/>>.
36. *Machine Vision 4 Users: Banner iVu versus Checker 3G* [online]. [cit.2012-10-10]. URL <<http://machinevision4users.blogspot.cz/2009/04/banner-ivu-versus-checker-3g.html>>.
37. *Machine Vision Interface Comparison and Evolution* [online]. [cit.2013-01-15]. URL <<http://www.ptgrey.com/support/downloads/documents/interface-comparison-2012.pdf>>.
38. *MANHATTAN: USB to Serial Converter* [online]. [cit.2013-05-10]. URL <<http://www.manhattan-products.com/en-US/products/708-usb-to-serial-converter>>.

39. *MW 12V/1,5A SUN | GES-ELECTRONICS* [online]. [cit.2013-03-20]. URL <<http://www.ges.cz/cz/mw-12v-1-5a-sun-GES07507602.html>>.
40. *Několik novinek v systému strojového vidění VisionLab 2.1 a Control Web 6.1 SP7* [online]. [cit.2012-12-17]. URL <<http://www.mii.cz/art?id=760&lang=405>>.
41. *NI EVS-1463RT - Real-Time Vision System for GigE Vision, Camera Link Devices - National Instruments* [online]. [cit.2012-12-10]. URL <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208391>>.
42. *NI PXIe-1435 - High-Performance Camera Link Frame Grabber - National Instruments* [online]. [cit.2012-12-10]. URL <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/209831>>.
43. *NI Vision Builder for Automated Inspection Tutorial* [online]. [cit.2012-12-06]. URL <<http://www.ni.com/pdf/manuals/373379f.pdf>>.
44. *PCIe-FIW Moduly video | Mouser* [online]. [cit.2012-12-21]. URL <http://cz.mouser.com/Embedded-Solutions/Video-Modules/_/N-8nl98?Keyword=PCIe-FIW&FS=True>.
45. *Pevný Megapixelový objektiv s manuální clonou FUJIFILM HF9HA-1B - ohnisko 9 mm, světelnost F1.4, do 1.5 Mpix | VIAKOM CZ s.r.o. - DOVOZCE A DISTRIBUTOR CCTV* [online]. [cit.2013-03-15]. URL <<http://www.viakom.cz/zbozi/cctv-prislusenstvi/objektivy/fujinon-fujifilm-japan-objektivy-z-katalogu/hf9ha-1b-c-mount-objektiv-9-mm-f1.4.html#zalozkaPopis2>>.
46. *PGN-Plus* [online]. [cit.2013-05-12]. URL <http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/PGN-plus_80_EN.pdf>.
47. *Point Grey Bumblebee®2* [online]. [cit.2012-11-06]. URL <<http://ww2.ptgrey.com/stereo-vision/bumblebee-2>>.
48. *Precision Lighting for Machine Vision* [online]. [cit.2013-02-15]. URL <http://files.microscan.com/NERLITE/nerlite_brochure.pdf>.
49. *PresencePLUS P4 OMNI & OMNI 1.3 Series* [online]. [cit.2012-11-10]. URL <<http://www.bannerengineering.com/en-US/products/sub/209>>.
50. *Prosilica GT - Allied Vision Technologies* [online]. [cit.2012-11-10]. URL <<http://www.alliedvisiontec.com/index.php?id=847>>.
51. *rci_2ant.jpg (JPEG obrázek, 512 × 446 bodů)* [online]. [cit.2013-03-14]. URL <http://www.way2c.com/rci_2ant.jpg>.
52. *RELKO - Velkoobchod přístrojů a příslušenství do rozvaděčů a elektroinstalačního materiálu* [online]. [cit.2012-11-16]. URL <<http://www.relko.cz/sr/3.html/?FQ-&vyrobce=Omron&slopec=kod>>.
53. *RELKO - Velkoobchod přístrojů a příslušenství do rozvaděčů a elektroinstalačního materiálu* [online]. [cit.2012-11-17]. URL <<http://www.relko.cz/sr/?6GF1&vyrobce=siemens&slopec=kod>>.
54. *RELKO - Velkoobchod přístrojů a příslušenství do rozvaděčů a elektroinstalačního materiálu* [online]. [cit.2012-11-17]. URL <http://www.relko.cz/sr/?FZ3%20omron%20lite&predvyplneni_textboxu_hledani=ano>.
55. *Sensors | Vision Systems | Xpectia-Lite | Omron, Česká republika* [online]. [cit.2012-11-08]. URL <http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/sensing/vision_sensors_and_systems/vision_systems/xpectia-lite/default.html>.
56. *Sick Inspector | Vision-Supplies.com - Vision, Sensors & Automation Components Distributor* [online]. [cit.2012-11-09]. URL <<http://www.vision-supplies.com/Catalog.aspx?cid=3381>>.
57. *SIMATIC VS120- Industry Automation & Drive Technologies - Siemens* [online]. [cit.2012-11-03]. URL

- <<http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=ca7cb31655&ctxp=home>>.
58. *System Price Examples* [online]. [cit.2012-11-01]. URL <<http://www.cesales.com/images/stories/Vendors/VisionBinder/DOCS/systempriceexamples.pdf>>.
 59. *Tamron 23FM50SP 2/3" 50mm F/2.8 C-Mount Lens with Lock. B&H Photo Video* [online]. [cit.2012-12-28]. URL <http://www.bhphotovideo.com/c/product/414380-REG/Tamron_23FM50SP_23FM50SP_2_3_50mm_F_2_8.html>.
 60. *Vision Sensors | Baumer Group* [online]. [cit.2012-11-23]. URL <<http://www.baumer.com/int-en/products/identification-image-processing/vision-sensors/>>.
 61. *Vision sensors inspector* [online]. [cit.2012-11-24]. URL <<http://www.sensorsincorporated.com/uploaded/Doc/Sick%20Inspector%20Data%20Sheet.pdf>>.
 62. *VisionPro 8.1 Quick Reference* [online]. [cit.2013-02-22]. URL <<http://www.cognex.com/support/downloads/File.aspx?d=2425>>.
 63. *What You Need to Know about Close-up Lenses. 2012* [online]. [cit.2013-03-08]. URL <http://s1.archive.theimagingsource.com/publications/whitepapers-optics/wpcloseuplen/1decbe42d75c6bf06d9065699178056248d1e2747773cb1636b8828708a9b7d5/wpcloseuplen.en_US.pdf>.
 64. *XUM L Miniature Economy Photoelectric Sensor* [online]. [cit.2012-11-28]. URL <<static.schneider-electric.us/...XUM/9004HO9525.pdf>>.

7 Seznam příloh

Příloha	Obsah
A	Dispoziční schéma pracoviště ABB IRB 140
B	Schéma zapojení elektrických signálů na pracovišti ABB IRB 140
C	Dispoziční schéma pracoviště ABB IRB 360
D	Schéma zapojení osvětlovacího systému na pracovišti ABB IRB 360

ZVLÁŠTNÍ PŘÍLOHA:

DVD s elektronickou verzí textu diplomové práce včetně příloh, videodokumentace, zdrojových kódů a výstupu ze simulace.